



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES

Desarrollo de un catálogo de secciones estructurales de pavimentos flexibles y rígidos enfocado en las carreteras de la red vial de la provincia del Azuay, aplicando la metodología de diseño AASHTO – 93

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL CON MENCIÓN EN GERENCIA DE CONSTRUCCIONES

Autoras:

MARÍA DE LOS ÁNGELES REINOSO MALDONADO
PAOLA ELIZABETH SANMARTÍN MORALES

Director:

ING. PABLO ANDRÉS CARVALLO CORRAL

CUENCA - ECUADOR

2022

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado a mi hermosa madre Marcela que, con su entusiasmo, dedicación y amor ha sabido brindarme todo el apoyo necesario para cumplir mis sueños y crecer como ser humano.

A mis queridos abuelitos Martha y Luis que con su confianza y amor infinito han sido mi motor para culminar con esta etapa. A mi padrastro y amigo Cristiam, que con sus bromas y consejos me motivó en mis días de renuncia y a mi compañera de tesis y amiga Paola, por su paciencia, cariño y confianza; hoy podemos culminar juntas con esta meta tan anhelada.

A mi papá Raúl, que con su apoyo me ayudó a conseguir este objetivo. A mi tío Chicho, por el apoyo incondicional cuando más lo necesitaba y a Angy, Cris, Pauli y Santi que han sido mi luz y rincón de paz, por todo esto y más este trabajo está dedicado a ustedes. (Ángeles Reinoso Maldonado)

DEDICATORIA

Dedicada al amor más grande que tengo en la vida, mi madre Patricia de los Ángeles, quien es mi pilar fundamental que con su esfuerzo, paciencia y amor me ha permitido llegar a cumplir esta meta.

A un ser muy especial, Margarita, por su cariño y brío. A mis abuelitos: Angelita y Gerardo, por ser mi guía en la vida. A mis tías: Elvia, Carmita y Sonia por su apoyo, consejo y orientación.

A mi querida compañera de carrera y vida, Ángeles, por su dedicación, esfuerzo y paciencia para culminar con éxito esta meta propuesta. Finalmente, a mis maravillosos amigos y amigas, por ser mi luz y soporte en los momentos más difíciles. (Paola Sanmartín Morales)

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro tutor de tesis el Ing. Pablo Carvallo quien con su experiencia y conocimiento nos orientó en la investigación y la realización de este proyecto.

A nuestra familia y amigos cercanos que supieron apoyarnos y brindarnos un consejo en este trayecto.

Finalmente, al Ing. José Vazquez Calero, director de la escuela de Ingeniería Civil y a todas las personas que dedicaron su tiempo para ayudarnos a culminar con nuestra tesis.

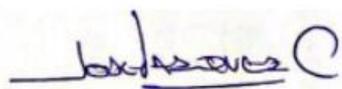
Un agradecimiento especial al Ing. Christian Moyano Tobar, quien supo guiarnos y brindarnos sus conocimientos a lo largo de nuestra vida universitaria. (Ángeles y Paola)

Desarrollo de un catálogo de secciones estructurales de pavimentos flexibles y rígidos enfocado en las carreteras de la red vial de la provincia del Azuay, aplicando la metodología de diseño AASHTO – 93

RESUMEN

Actualmente, la provincia del Azuay no cuenta con una guía de consulta para la selección de estructuras de pavimentos de manera rápida y sencilla, por lo que se desarrolló un catálogo de secciones estructurales de pavimentos flexibles y rígidos, a partir del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas (W8.2) y el CBR de la subrasante para las carreteras de la provincia del Azuay. Partiendo de la revisión bibliográfica y la investigación cualitativa se seleccionaron los rangos de tráfico, subrasante y los parámetros de diseño correspondientes para la aplicación de la metodología AASHTO – 93. Las soluciones de diseño se presentan por medio de ocho cartillas, las cuales poseen 210 secciones estructurales para el diseño de pavimentos con diferentes espesores y materiales. Además, se comparó el catálogo con estudios de pavimentos realizados en la provincia del Azuay, obteniéndose una semejanza del 86.9% para pavimentos flexibles y un 81.36% para pavimentos rígidos.

Palabras clave: ejes equivalentes (ESALs), pavimento, relación de soporte de California (CBR), secciones estructurales.



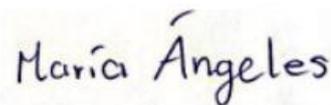
Ing. José Fernando Vázquez Calero

DIRECTOR DE ESCUELA



Ing. Pablo Andrés Carvallo Corral

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



María de los Ángeles Reinoso Maldonado

TESISTA



Paola Elizabeth Sanmartín Morales

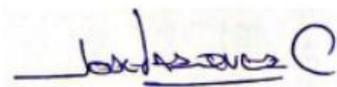
TESISTA

Development of a catalog of structural sections of flexible and rigid pavements focused on the roads of the road network of the province of Azuay, applying the AASHTO – 93 design methodology

ABSTRACT

Currently the province of Azuay does not have a reference guide to select pavement structures in a quick and easy way. Therefore, a catalogue of structural sections of flexible and rigid pavements was developed, based on the number of equivalent axes of 8.2 tons (W8.2) and the CBR of the subgrade for the roads of the province of Azuay. Based on the bibliographic review and qualitative research, the traffic ranges, the traffic subgrade and the corresponding design parameters were selected for the application of the AASHTO - 93 methodology. The design solutions are presented through 8 booklets, which have 210 structural sections for the design of pavements with different thicknesses and materials. In addition, the catalog was compared with pavement studies carried out in the province of Azuay, obtaining a similarity of 86.9% for flexible pavements and 81.36% for rigid pavements.

Keywords: equivalent axles (ESALs), pavement, California Bearing Ratio (CBR), structural section.



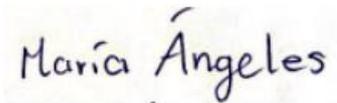
Ing. José Fernando Vázquez Calero

SCHOOL DIRECTOR



Ing. Pablo Andrés Carvallo Corral

THESIS DIRECTOR



María de los Ángeles Reinoso Maldonado

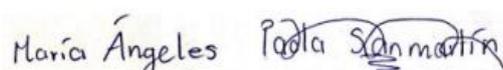
AUTHOR



Paola Elizabeth Sanmartín Morales

AUTHOR

Translated by



María de los Ángeles Reinoso and Paola Sanmartín



Índice de contenidos

DEDICATORIA	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT.....	V
INTRODUCCIÓN	1
ESTADO DEL ARTE.....	2
JUSTIFICACIÓN	4
OBJETIVOS	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO 1.....	6
Fundamentación teórica	6
1.1. Definición de pavimento	6
1.2. Características de los pavimentos	6
1.3. Factores importantes para el diseño de pavimentos	7
1.3.1. El tráfico.....	8
1.3.2. La subrasante	8
1.3.3. Los materiales	9
1.3.4. El clima	10
1.4. Características superficiales de los pavimentos	12
1.4.1. Resistencia al deslizamiento	13
1.4.2. Regularidad superficial	14
1.4.3. Textura superficial del pavimento	15
1.4.4. Características ópticas.....	16
1.5. Tipos de pavimentos.....	17
1.5.1. Pavimentos flexibles	17
1.5.2. Pavimentos semirrígidos.....	20
1.5.3. Pavimentos rígidos.....	20
1.5.4. Pavimentos articulados	22
1.6. Métodos de diseño.....	23
1.6.1. Métodos de diseño para pavimentos flexibles	23
1.6.2. Métodos de diseño para pavimentos rígidos.....	30

CAPÍTULO 2.....	34
Metodología de diseño AASHTO 93.....	34
2.1. Análisis de la normativa vigente y estándares nacionales e internacionales aplicables	34
2.1.1. Base legal.....	34
2.1.2. Especificaciones generales para el tráfico	34
2.1.2.1. Clasificación del tráfico.....	34
2.1.2.2. Composición del tráfico.....	35
2.1.3. Especificaciones generales para la estructura del pavimento	37
2.1.3.1. Base	37
2.1.3.2. Subbase.....	39
2.1.3.3. Mejoramiento de la subrasante	40
2.2. Variables de entrada.....	41
2.2.1. Tránsito	41
2.2.1.1. Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas (W18).....	41
2.2.1.2. Tráfico futuro (Tf)	41
2.2.1.3. Factor de carga equivalente (FCE _{TOTAL})	43
2.2.1.4. Factor de distribución del tráfico (Dt)	45
2.2.2. Californian Bearing Ratio (CBR)	46
2.2.2.1. Definición	46
2.2.2.2. Relación del CBR con el Penetrómetro dinámico de cono (PDC).....	47
2.2.2.3. Métodos para la determinación del CBR de diseño	48
2.3. Diseño de pavimentos flexibles.....	51
2.3.1. Fórmula AASHTO 93.....	51
2.3.2. Serviciabilidad (Δ PSI)	51
2.3.3. Desviación normal estándar (Z_r).....	52
2.3.4. Desviación normal integral (S_0).....	54
2.3.5. Módulo de resiliencia (M_r).....	54
2.3.6. Número estructural (SN).....	56
2.3.6.1. Coeficiente estructural de capa (a_i).....	56
2.3.6.2. Drenaje (m_i).....	60
2.3.6.3. Espesores mínimos (d_i).....	61
2.4. Diseño pavimentos rígidos	62
2.4.1. Fórmula AASHTO 93.....	62
2.4.2. Serviciabilidad Δ PSI.....	62

2.4.3.	Desviación normal estándar (Z_r).....	63
2.4.4.	Desviación normal integral (S_0).....	63
2.4.5.	Módulo de reacción de la superficie (k)	64
2.4.6.	Coeficiente de drenaje (C_{dx}).....	66
2.4.7.	Resistencia media del concreto (M_r).....	66
2.4.8.	Módulo de elasticidad del concreto (E_C)	67
2.4.9.	Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas (J).....	67
CAPÍTULO 3.....		69
Desarrollo del catálogo de secciones estructurales para pavimentos.....		69
3.1.	Rangos de tráfico (ESALs)	69
3.2.	Rangos de CBR	71
3.3.	Descripción del programa comercial (Método AASHTO para el diseño de pavimentos 1993).....	72
3.3.1.	Procedimiento de cálculo para pavimento rígido.....	73
3.3.1.1.	Datos de entrada	73
3.3.1.2.	Información de la estructura.....	75
3.3.1.3.	Resultados.....	76
3.4.	Descripción del programa (Excel).....	76
3.4.1.	Procedimiento de cálculo para pavimento flexible.....	76
3.4.1.1.	Datos de entrada	76
3.4.1.2.	Información de la estructura	77
3.4.1.3.	Resultados.....	78
3.5.	Criterios de diseño establecidos para el desarrollo del catálogo.....	78
3.5.1.	Pavimento flexible	79
3.5.2.	Pavimento rígido.....	79
3.6.	Catálogo de números estructurales (SN) de pavimentos flexibles para las carreteras de la provincia del Azuay, período de diseño 10 años	80
3.7.	Catálogo de estructuras	81
3.7.1.	Cartas de diseño	81
3.7.2.	Catálogo de ilustraciones de estructuras de pavimentos flexibles para las carreteras de la provincia del Azuay, período de diseño 10 años.....	81
3.7.3.	Catálogo de ilustraciones de estructuras de pavimentos rígidos para las carreteras de la provincia del Azuay, período de diseño 20 años.....	84
CAPÍTULO 4.....		90
Comparación del catálogo de secciones estructurales para pavimentos con estudios realizados dentro de la provincia del Azuay		90

4.1. Cartas de diseño	90
4.2. Revisión de los estudios de pavimentos flexibles	91
4.2.1. Estudio de tráfico, diseño geométrico, diseño hidrológico, drenaje, diseño de pavimento y presupuesto de la vía San Fernando - Yaguarcocha, cantón San Fernando – provincia del Azuay, longitud de 4 kilómetros.....	91
4.2.2. Diseño de un tramo vial, obras complementarias de ingeniería y presupuesto de construcción de una carretera rural, aplicada a la vía Cauquil-Parcuspamba, perteneciente al cantón Girón (2 km).....	91
4.2.3. Mejoramiento, diseño vial y de pavimento flexible de la vía Parcoloma-San Bartolo- Octavio Cordero Palacios.....	92
4.2.4. Diseños definitivos de las calles Salto de la Soga, Juego de la Pallca y Juego de Ajedrez, incluye diseño geométrico, de pavimentos y muros de contención.....	93
4.2.5. Diseño de pavimentos y análisis económico de la calle Paseo Tres de Noviembre y de la calle Colombia, de la ciudad de Cuenca	94
4.2.6. Estudios geométricos, diseño de pavimentos y levantamientos topográficos de la calle Rafael Aguilar de la parroquia El Batán	95
4.2.7. Estudios geométricos, diseño de pavimentos y levantamientos topográficos de la calle Fernando Pazan de la parroquia Machángara	95
4.2.8. Estudios geométricos, diseño de pavimentos y levantamientos topográficos de la calle De las Pomarosas de la parroquia San Sebastián.....	96
4.2.9. Diseños definitivos para el mejoramiento de la vía Centro Parroquial, Santa Catalina, el Despacho, Santa Sofía y Guncay de la parroquia de El Valle	96
4.2.10. Estudio y diseño definitivo a nivel de pavimento flexible de la vía La Unión – El Progreso – Mollepongo de la parroquia Pucara, cantón Pucara desde la abscisa 0+000 hasta la abscisa 5+043	97
4.2.11. Diseño de la vía periurbana Las Cuadras – Capillapamba, para el cantón Chordeleg.....	98
4.2.12. Diseño geométrico y de pavimentos de la vía “Camino a Ucholoma” de la parroquia de Baños, cantón Cuenca	98
4.2.13. Estudios de ingenierías para el diseño geométrico, de pavimentos, hidráulicos, estructuras de contención, para la vía Naranjos, Guaguazhumi y Cochas de la parroquia Paccha del cantón Cuenca de la provincia del Azuay en una extensión aproximada de 10.0 km.....	99
4.2.14. Estudios de ingenierías para el diseño geométrico, de pavimentos, hidráulicos, estructuras de contención, para la vía Naranjos, Guaguazhumi y Cochas de la parroquia Paccha del cantón Cuenca de la provincia del Azuay en una extensión aproximada de 10.0 km	100
4.2.15. Consultoría de estudios geométricos para el mejoramiento vial de 12.5 km para la parroquia Baños, cantón Cuenca, provincia del Azuay”	100

4.2.16. Estudios de consultoría para la construcción y/o rehabilitación y mejoramiento de las calles aceras y bordillos de diferentes vías de la parroquia San Joaquín cantón Cuenca - Provincia del Azuay	101
4.2.17. Estudio y diseños definitivos de ingeniería para el mejoramiento vial del tramo Guachún – entrada a Cristo Rey – quebrada El Chocar de la parroquia San Cristóbal en una extensión aproximada de 2.3 km	101
4.2.18. Diseño de pavimento flexible para la vía: Panamericana Norte – Zhiquir – Bomba de Agua, parroquia Llacao.....	102
4.3. Revisión de los estudios de pavimentos rígidos.....	102
4.3.1. Diseños definitivos para el mejoramiento de la vía Centro Parroquial, Santa Catalina, el Despacho, Santa Sofía y Guncay de la parroquia de El Valle	102
4.3.2. Diseño de pavimento rígido para reposición de calzada: calle Enrique Guapizaca y Martín Gárate.....	103
4.3.3. Diseños definitivos de las calles Santo de la Soga, Juego de la Pallca y Juego de Ajedrez, incluye diseño geométrico, de pavimentos y muros de contención.....	103
4.3.4. Diseño de pavimentos y análisis económico de la calle Paseo Tres de Noviembre y de la calle Colombia, de la ciudad de Cuenca	104
4.3.5. Estudios geométricos, diseños de pavimentos y levantamientos topográficos de varias calles de la ciudad de Cuenca dentro del programa de pavimentación barrio para mejor vivir	105
4.4. Resultados	109
CONCLUSIONES	113
RECOMENDACIONES.....	114
REFERENCIAS.....	116
ANEXOS	122

Índice de figuras

Figura 1.1. Rangos de temperatura media anual registrados en el Ecuador	11
Figura 1.2. Precipitación anual registrada en el Ecuador.....	12
Figura 1.3. Cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías, en una escala estándar establecido por el Banco Mundial.....	14
Figura 1.4. Clasificación de los pavimentos atendiendo a su macrotextura y microtextura superficial.....	16
Figura 1.5. Principales modos de reflexión de la luz.....	17
Figura 1.6. Estructura típica de un pavimento flexible.....	18
Figura 1.7. Distribución de las cargas en el pavimento flexible.....	18
Figura 1.8. Estructura típica de un pavimento semirrígido.....	20
Figura 1.9. Estructura típica de un pavimento rígido.....	21
Figura 1.10. Distribución de las cargas en el pavimento rígido.....	21
Figura 1.11. Estructura típica de un pavimento articulado.....	22
Figura 1.12. Diagrama de diseño para base estabilizada con emulsión tipo I.....	24
Figura 1.13. Curva que devuelve el criterio de deformación horizontal en la fibra inferior de las capas asfálticas.....	27
Figura 1.14. Curva que devuelve el criterio de deformación vertical en subrasante.....	27
Figura 1.15. Envoltente que satisface a la par la deformación horizontal (ϵT) y la deformación vertical (ϵV).....	28
Figura 1.16. Espesores de pavimento en carreteras, en función del VRS.....	29
Figura 1.17. Análisis de fatiga – Repetición de carga admisible con base en el factor de relación de esfuerzos (con y sin bermas de concreto).....	31
Figura 1.18. Repetición de carga admisible con base en el factor de erosión (sin berma de concreto).....	32
Figura 2.1. Curvas de penetración “CBR” para distintos suelos.....	47
Figura 2.2. Coeficientes estructurales para capas asfálticas.....	57
Figura 2.3. Gráfico para determinar el coeficiente estructural de capas asfálticas en función del módulo resiliente.....	57
Figura 2.4. Relación entre el coeficiente estructural para base granular y distintos parámetros resistentes.....	58
Figura 2.5. Relación entre el coeficiente estructural para subbase granular y distintos parámetros resistentes.....	58
Figura 2.6. Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante, suponiendo una profundidad infinita.....	64
Figura 2.7. Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos.....	65
Figura 2.8. Ilustración del concepto de transferencia de cargas.....	68
Figura 3.1. Interfaz del programa para pavimento flexible.....	73
Figura 3.2. Interfaz del programa para pavimento rígido.....	73
Figura 3.3. Confiabilidad y desviación estándar.....	74
Figura 3.4. Serviciabilidad de diseño en función del tipo de carretera.....	74
Figura 3.6. Coeficientes de drenaje.....	76
Figura 3.7. Datos de entrada.....	77
Figura 3.8. Información de la estructura.....	78
Figura 3.9. Cartas de diseño para las alternativas estructurales.....	81

Figura 4.1. Cartas de diseño para las alternativas estructurales de los estudios y tesis	90
Figura 4.2. Resultados de la semejanza de los números estructurales entre el catálogo y los estudios para pavimentos flexibles	110
Figura 4.3. Porcentaje total de la semejanza y error de los números estructurales de los estudios con respecto al catálogo para pavimentos flexibles	111
Figura 4.4. Resultados de la semejanza de los espesores de pavimento entre el catálogo y los estudios para pavimentos rígidos	112
Figura 4.5. Porcentaje total de la semejanza y error de los espesores de pavimentos de los estudios con respecto al catálogo para pavimentos rígidos	112

Índice de tablas

Tabla 2.1. Clasificación de Carreteras de Acuerdo al Tráfico.....	35
Tabla 2.2. Nacional de Pesos y Dimensiones: Tipo de vehículos motorizados remolques y semirremolques	36
Tabla 2.3. Nacional de Pesos y Dimensiones: Posibles combinaciones.....	37
Tabla 2.4. Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	38
Tabla 2.5. Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	38
Tabla 2.6. Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	39
Tabla 2.7. Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	39
Tabla 2.8. Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	40
Tabla 2.9. Tasas de crecimiento por tipo de vehículo y para el período de vida útil del proyecto para el Azuay	42
Tabla 2.10. Relación de Cargas por Eje para determinar Ejes Equivalentes (EE) Para Afirmados, Pavimentos Flexibles y Semirrígidos	44
Tabla 2.11. Relación de Cargas por Eje para determinar Ejes Equivalentes (EE) para Pavimentos Rígidos	44
Tabla 2.12. Factores de Distribución Direccional y de Carril para determinar el Tránsito en el Carril de Diseño	45
Tabla 2.13. Percentiles para determinar el CBR de diseño.....	49
Tabla 2.14. Niveles de confiabilidad aconsejados por AASHTO	53
Tabla 2.15. Porcentaje de confiabilidad con su respectiva desviación normal estándar	53
Tabla 2.16. Coeficientes Estructurales de las Capas del Pavimento a_i	59
Tabla 2.17. Capacidad del drenaje.....	60
Tabla 2.18. Valores recomendados del coeficiente de drenaje (m_i), para capas granulares no tratadas en pavimentos flexibles	61
Tabla 2.19. Espesores mínimos de concreto asfáltico y base granular	61
Tabla 2.20. Valores Recomendados de Resistencia del Concreto según rango de Tráfico	67
Tabla 2.21. Valores de coeficiente de Transmisión de Carga J	68
Tabla 3.1. Clasificación de Carreteras en función de la demanda en Perú.....	69
Tabla 3.2. Rangos de tráfico en Ejes Equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$), en el Carril de Diseño Para Pavimentos Flexibles, con período de diseño a 10 años.....	70
Tabla 3.3. Rangos de tráfico en Ejes Equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$), en el Carril de Diseño Para Pavimentos Rígidos, con período de diseño a 20 años	71
Tabla 3.4. Tabla de clasificación y uso del suelo según el valor de CBR	71
Tabla 3.5. Categorías de Subrasante	71
Tabla 3.6. Rangos de CBR.....	72
Tabla 3.7. Número estructural (SN) requerido para pavimentos flexibles en función del tráfico ESAL's y CBR de la subrasante, periodo de diseño 10 años	80
Tabla 3.8. Catálogo de estructuras de pavimento flexible desde el tráfico T1 hasta el tráfico T4	82
Tabla 3.9. Catálogo de estructuras de pavimento flexible desde el tráfico T5 hasta el tráfico T9	83
Tabla 3.10. Catálogo de estructuras de pavimento rígido con bermas de concreto hidráulico sin pasadores.....	84
Tabla 3.11. Catálogo de estructuras de pavimento rígido con bermas de concreto hidráulico con pasadores desde el tráfico T1 hasta el tráfico T4.....	85

Tabla 3.12. Catálogo de estructuras de pavimento rígido con bermas de concreto hidráulico con pasadores desde el tráfico T5 hasta el tráfico T9	86
Tabla 3.13. Catálogo de estructuras de pavimento rígido con bermas granulares o asfálticas sin pasadores	87
Tabla 3.14. Catálogo de estructuras de pavimento rígido con bermas granulares o asfálticas con pasadores desde el tráfico T1 hasta el tráfico T4	88
Tabla 3.15. Catálogo de estructuras de pavimento rígido con bermas granulares o asfálticas con pasadores desde el tráfico T5 hasta el tráfico T9	89
Tabla 4.1. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía San Fernando – Yaguarcocha y el catálogo de la tabla 3.7	91
Tabla 4.2. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la vía Cauquil-Parcuspamba y el catálogo de la tabla 3.7	91
Tabla 4.3. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la vía Parcoloma-San Bartolo- Octavio Cordero Palacios y el catálogo de la tabla 3.7	92
Tabla 4.4. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de las calles Salto de la Soga, Juego de la Pallca y Juego de Ajedrez y el catálogo de la tabla 3.7	93
Tabla 4.5. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Paseo Tres de Noviembre de la ciudad de Cuenca y el catálogo de la tabla 3.7	94
Tabla 4.6. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Colombia de la ciudad de Cuenca y el catálogo de la tabla 3.7	94
Tabla 4.7. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la calle Rafael Aguilar y el catálogo de la tabla 3.7	95
Tabla 4.8. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la calle Fernando Pazan y el catálogo de la tabla 3.7	95
Tabla 4.9. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía Tendales – Alppacruz y el catálogo de la tabla 3.7	96
Tabla 4.10. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía Centro Parroquial, Santa Catalina, el Despacho, Santa Sofía y Guncay y el catálogo de la tabla 3.7	96
Tabla 4.11. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía La Unión – El Progreso – Mollepongo y el catálogo de la tabla 3.7	97
Tabla 4.12. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía Las Cuadras – Capillapamba y el catálogo de la tabla 3.7	98
Tabla 4.13. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía Camino a Ucholoma y el catálogo de la tabla 3.7	98
Tabla 4.14. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía Cochas y el catálogo de la tabla 3.7	99
Tabla 4.15. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía Naranjos y el catálogo de la tabla 3.7	100
Tabla 4.16. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la Zona 5(calle Ucholoma – Señor del Cautivo) y el catálogo de la tabla 3.7	100
Tabla 4.17. Comparación de los números estructurales de las vías de la parroquia San Joaquín cantón Cuenca y el catálogo de la tabla 3.7	101
Tabla 4.18. Comparación de los números estructurales del tramo Guachun – entrada a Cristo Rey – quebrada El Chocar de la parroquia San Cristóbal y el catálogo de la tabla 3.7	101
Tabla 4.19. Comparación de los números estructurales de la vía Panamericana Norte – Zhiquir – Bomba de Agua de la parroquia Llaqueo y el catálogo de la tabla 3.7	102

Tabla 4.20. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la vía Centro Parroquial, Santa Catalina, el Despacho, Santa Sofía y Guncay y el catálogo de secciones estructurales	102
Tabla 4.21. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la vía Centro Parroquial, Santa Catalina, el Despacho, Santa Sofía y Guncay y el catálogo de secciones estructurales	103
Tabla 4.22. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de las calles Salto de la Soga, Juego de la Pallca y Juego de Ajedrez y el catálogo de secciones estructurales.	103
Tabla 4.23. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Paseo Tres de Noviembre de la ciudad de Cuenca y el catálogo de secciones estructurales.....	104
Tabla 4.24. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Colombia de la ciudad de Cuenca y el catálogo de secciones estructurales.....	104
Tabla 4.25. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Alfonso Cuesta Cuesta de la parroquia Bellavista y el catálogo de secciones estructurales	105
Tabla 4.26. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Rafel Aguilar de la parroquia El Batán y el catálogo de secciones estructurales.....	105
Tabla 4.27. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Batallón Numancia de la parroquia El Vecino y el catálogo de secciones estructurales	106
Tabla 4.28. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Fernando Pazán de la parroquia Machángara y el catálogo de secciones estructurales	106
Tabla 4.29. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Retornada a la Av. Rayoloma de la parroquia Monay y el catálogo de secciones estructurales.....	107
Tabla 4.30. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle De las Pomarosas de la parroquia San Sebastian y el catálogo de secciones estructurales	107
Tabla 4.31. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Puna de la parroquia Sucre y el catálogo de secciones estructurales	108
Tabla 4.32. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Río San Lorenzo de la parroquia Yanuncay y el catálogo de secciones estructurales	108
Tabla 4.33. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Coronel Monsalve de la parroquia Hermano Miguel y el catálogo de secciones estructurales.....	109
Tabla 4.34. Resultados de la comparación de los números estructurales entre el catálogo y los estudios para pavimentos flexibles	110
Tabla 4.35. Resultados de la comparación de los espesores de pavimento entre el catálogo y los estudios para pavimentos rígidos	111

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.1. Ecuación de la AASHTO 93 para pavimentos flexibles.....	25
Ecuación 1.2. Ecuación de la AASHTO 93 para pavimentos rígidos	33
Ecuación 2.1. Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas.....	41
Ecuación 2.2. Tráfico futuro proyectado según el período de diseño.....	42
Ecuación 2.3. Factor de carga equivalente total	43
Ecuación 2.4. Tráfico futuro proyectado según el período de diseño.....	45
Ecuación 2.5. Californian bearing ratio	48
Ecuación 2.6. Californian bearing ratio con $CBR \leq 10\%$	48
Ecuación 2.7. Californian bearing ratio para CH.....	48
Ecuación 2.8. CBR de diseño	50
Ecuación 2.9. Valor medio de los valores de CBR.....	50
Ecuación 2.10. Desviación estándar de los valores de CBR.....	50
Ecuación 2.11. Índice de servicio presente	51
Ecuación 2.12. Módulo de resiliencia para todos los valores de CBR	55
Ecuación 2.13. Módulo de resiliencia para $CBR < 10\%$	55
Ecuación 2.14. Módulo de resiliencia para suelos finos con $CBR < 7.2\%$	55
Ecuación 2.15. Módulo de resiliencia para suelos finos $7.2\% < CBR < 20\%$	55
Ecuación 2.16. Módulo de resiliencia para suelos granulares	55
Ecuación 2.17. Número estructural.....	56
Ecuación 2.18. Módulo de reacción de la superficie para $CBR \leq 10\%$	65
Ecuación 2.19. Módulo de reacción de la superficie para $CBR \geq 10\%$	65
Ecuación 2.20. Coeficiente de reacción combinado	66
Ecuación 2.21. Resistencia media del concreto	67
Ecuación 2.22. Módulo de elasticidad del concreto	67

INTRODUCCIÓN

En Ecuador, la infraestructura vial se ha convertido en una necesidad básica para aumentar los niveles de crecimiento económico entre las diferentes ciudades, reduciendo los tiempos de desplazamiento y manteniendo la seguridad de los usuarios. Los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) Municipales y Provinciales del Ecuador, entidades encargadas del diseño, construcción y mantenimiento vial, en ocasiones no cuentan con los recursos económicos suficientes para el desarrollo completo de un proyecto de diseño de pavimentos, especialmente, para carreteras con bajo tránsito o secundarias que conforman la red vial de la provincia del Azuay.

Por lo tanto, en este trabajo se propone realizar un catálogo de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos, que sirva como guía de consulta brindando una solución práctica, rápida y de fácil aplicación. Además, se puede realizar la comprobación de diseños existentes, logrando un mayor desempeño en eficiencia técnica y económica, favoreciendo a los usuarios.

“Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados” (Montejo Fonseca, 2002, p. 1). Para el diseño de las estructuras de pavimento flexible y rígido se aplicó la metodología de diseño AASHTO 93, una de las metodologías más utilizadas para el diseño de pavimentos.

Este método estima que, el pavimento recién construido empieza a dar servicio a un nivel alto, es así que a medida que transcurre el tiempo, y con él las repeticiones de carga de tránsito, el nivel de servicio baja. El método impone un nivel de servicio final que se debe mantener al terminar el periodo de diseño. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2013).

Se tomó como referencia una tesis realizada en México que presentó un catálogo de secciones para pavimentos flexibles, considerando como variables principales las condiciones de tráfico y de terreno. Este estudio utilizó varias metodologías, incluyendo la AASHTO 93 y tomó como guía los catálogos de España y Francia. El resultado fue un catálogo que representaría un ahorro económico para los gobiernos (Cano Becerril, 2006).

Finalmente, con la información anterior se pretende desarrollar un catálogo de secciones estructurales de pavimentos flexibles y rígidos, a partir del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$) que soporta las carreteras que conforman la red vial de la provincia del Azuay y el CBR de la subrasante, aplicando la metodología de diseño AAHSTO-93.

ESTADO DEL ARTE

En la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo se publicó una investigación acerca de la evaluación del tránsito vehicular de la Red Carretera Nacional, aplicado para la actualización del Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las carreteras de la República Mexicana. Fue necesario seleccionar un conjunto de puntos de aforo vehiculares distribuidos por todo el territorio mexicano, que resulten representativos, y mediante el análisis de datos seleccionados poder caracterizar el comportamiento del tránsito vehicular en distintos tramos de las carreteras del país. El estudio realizó la cuantificación del daño acumulado medido en ejes equivalentes de 8.2 toneladas. El análisis se basó en los principios de la lógica difusa y a través, de la técnica de agrupamiento de datos cuantitativos llamada *fuzzy sets*. Los resultados clasificaron el tránsito vehicular mexicano en trece categorías, basadas en la relación existente entre la Intensidad Media Diaria de Vehículos Pesados (IMDp) y el daño estimado en ejes equivalentes para un período de diseño de 20 años. Con estos datos se logra una mejora general del catálogo de secciones de pavimentos, ya que se establecen nuevas categorías que resultan representativas (González Castro, 2020).

Una propuesta internacional es el trabajo en Alejos et al. (2021), quienes desarrollan un catálogo de estructuras de pavimentos básicos tratados para aportar al estudio de pre-factibilidad en el camino vecinal Pacobamba-Huironay-Ccerabamba-abra Cusqueña, provincia de Andahuaylas. El método de estudio utilizó un árbol de posibilidades que permita establecer los parámetros de diseño con las metodologías AASHTO – 93 y Wirtgen, para el tratamiento de una capa granular, a su vez, diseñar estructuras de pavimentos a nivel de solución básica para la construcción de catálogos, que fueron constituidos por variables como el tráfico, CBR y agentes estabilizadores; además, las capas estructurales estarán conformadas por una capa de rodadura fija y capas de material granular tratadas. Los catálogos obtenidos se aplicaron para evaluar el diseño óptimo del camino vecinal; asimismo, fueron evaluados mediante Análisis de Precios Unitarios (APU) para que sean accesibles económicamente.

A nivel internacional, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y la Dirección General de Servicios Técnicos (2018), generaron un catálogo de secciones estructurales de pavimentos para las carreteras de la República Mexicana, a través de la utilización del método AASHTO-93 para pavimentos rígidos y semirrígidos, y del método del Instituto de Ingeniería de la UNAM para pavimentos flexibles. En este catálogo se categorizó los tipos de materiales que componen el terreno natural, las temperaturas mínimas y máximas y la precipitación pluvial. Además, se realizó un estudio de los datos de tránsito, lo que permitió crear rangos en función de los ejes equivalentes de 8.2 T, que ayuden a elegir las secciones estructurales para un proyecto en específico y que sirvan de guía rápida de consulta para los ingenieros que realizan los estudios y proyectos de pavimentos (Secretaría de Comunicaciones y Transportes y la Dirección General de Servicios Técnicos, 2018).

En la Universidad de Sevilla, en cambio, se realizó la investigación sobre las estructuras de pavimentos definidos en el Catálogo de la Instrucción de Carreteras de la norma 6.1, para comprobar si las secciones propuestas cumplen con los criterios de resistencia y durabilidad del pavimento. Este trabajo se efectuó mediante la utilización de herramientas informáticas como el método analítico basado en modelos multicapa y el método de elementos finitos; posteriormente, se analizaron los resultados, obteniendo datos que se aproximan a la norma (Díaz, 2019).

A nivel internacional, en la Universidad César Vallejo en Piura – Perú, se realizó un trabajo de titulación sobre el diseño estructural de pavimento flexible de alto tránsito para uso en asentamiento humano aplicando la metodología AASHTO-93, con el propósito de resolver la problemática de inaccesibilidad a la zona. Este trabajo se determinó a partir de los ejes equivalentes de diseño y el CBR de la subrasante, obteniendo los espesores de la estructura de pavimento, adquiriendo, además, un diseño óptimo y mejor desempeño, ante posibles fallas estructurales (Castro & Pacsi, 2021).

En la Universidad César Vallejo, Suica (2020) realizó un estudio comparativo del diseño de pavimento flexible, empleando el método AASHTO-93 y mecánico – empírico, con el objetivo de determinar un diseño óptimo, mediante la recolección de datos realizados en laboratorio, en campo e informes técnicos, consiguiendo resultados que tienen mucha variación

en cada capa de la estructura y obteniendo un diseño óptimo mediante la metodología AASHTO-93, debido a que, la avenida no cuenta con un nivel alto de tráfico.

A nivel nacional, Espinoza (2018) realizó un análisis de alternativas en el diseño de pavimentos flexibles y rígidos mediante la metodología de diseño AASHTO-93, con la finalidad de comparar las alternativas y los costos totales de diseño. La metodología que se usó fue un software en Matlab que permite validar las diferentes opciones de diseño. Se concluyó que los pavimentos flexibles con espesores mínimos de la capa de rodadura en función de los ejes equivalentes, son de menor costo; y, los pavimentos rígidos son más económicos, con un período de diseño de 15 años.

La tesis elaborada por Cano Becerril (2006) presenta un catálogo de secciones de pavimentos flexibles para México. El estudio se realizó para diferentes condiciones de tráfico y de terreno. Se utilizaron tres métodos para el diseño de las secciones como: AASHTO 93, UNAM y el del Instituto del Asfalto, tomando como guía los catálogos de España y Francia. Las variables principales son el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$) y el valor de soporte (VRS). Finalmente, se comprobó que los esfuerzos, deformaciones y deflexiones no superen los límites de la ley de fatiga de los materiales, obteniéndose un catálogo que representaría un ahorro económico para los gobiernos.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la provincia del Azuay no cuenta con una guía de consulta técnica para el diseño de secciones estructurales de pavimentos flexibles y rígidos, por lo tanto, no hay forma de comprobar estos diseños; además, no hay una metodología para el proyecto a diseñar que facilite y simplifique el trabajo del ingeniero.

Las instituciones encargadas del diseño, construcción y mantenimiento vial, en ocasiones, no cuentan con los medios financieros necesarios para realizar el estudio completo de un diseño de pavimentos, por lo que, en este trabajo se propone un catálogo de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos, que permita estandarizar, optimizar y homogeneizar las soluciones de diseño de pavimentos flexibles y rígidos para las carreteras que conforman la red vial de la provincia del Azuay.

Por lo tanto, la siguiente investigación permite la comprobación de diseños de secciones estructurales de pavimentos flexibles y rígidos, facilitando a los profesionales de la ingeniería pautas y criterios técnicos al momento de definir una estructura de pavimento en función del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$) que soporta la vía a diseñar, así como, la capacidad de soporte de la subrasante (CBR), ahorrando tiempo, recursos económicos y satisfaciendo las necesidades de la comunidad.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un catálogo de secciones estructurales de pavimentos flexibles y rígidos, a partir del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$) que soporta las carreteras que conforman la red vial de la provincia del Azuay y el CBR de la subrasante, aplicando la metodología de diseño AAHSTO-93.

Objetivos específicos

- Establecer rangos de tráfico (ESALs) y CBR a partir de la Normativa vigente, estándares Nacionales e Internacionales aplicables y de la investigación bibliográfica.
- Aplicar la metodología de diseño AASHTO-93 y los criterios correspondientes para el diseño de las secciones estructurales.
- Desarrollar soluciones de secciones estructurales para carreteras por medio de un catálogo con estructuras predefinidas.
- Realizar una comparación de números estructurales y espesores entre el catálogo de secciones estructurales y estudios viales elaborados en la provincia del Azuay.

CAPÍTULO 1

Fundamentación teórica

1.1. Definición de pavimento

El pavimento está formado por un grupo de capas que se diseñan y construyen con materiales apropiadamente compactados, que se apoyan sobre la subrasante de una carretera que es la resultante del movimiento de tierras en el proceso de exploración (Montejo Fonseca, 2006).

De acuerdo al Manual de carreteras realizado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú (MTC, 2013): “El Pavimento es una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito” (p. 23). Cabe señalar que, de manera general, el pavimento se compone de las capas: base, subbase y de rodadura.

Desde el punto de vista de Rondón Quintana y Reyes Lizcano (2015), los pavimentos para vías urbanas y carreteras son estructuras viales compuestas por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales, que soportan las cargas impuestas por el tránsito y por las condiciones ambientales, con la finalidad de brindar un paso seguro, cómodo y confortable a los vehículos y usuarios. Este pavimento se apoya sobre la subrasante natural que puede ser mejorada, estabilizada o un terraplén.

Existen varios tipos de pavimentos, que pueden ser diseñados dependiendo de la situación económica, tales como: pavimento flexible, semirrígido, rígido y articulado.

1.2. Características de los pavimentos

Un pavimento debe cumplir con las siguientes características para que pueda funcionar de manera óptima según Montejó Fonseca (2006):

- Los pavimentos tienen que resistir las cargas aplicadas por el tráfico.

- Tienen que ser capaces de resistir los agentes externos como las variaciones climatológicas diarias.
- Debe poseer una textura superficial apropiada para las velocidades señaladas de circulación de los vehículos. Desde el punto de vista de Fleites Aparicio (2017), una adecuada textura superficial permite una correcta distancia de frenado de un vehículo al realizar una parada de emergencia y reduce el riesgo de salida de vehículos de la vía por la fuerza centrífuga.
- Tiene que proporcionar resistencia al efecto abrasivo causado por los neumáticos de los vehículos.
- Debe presentar regularidad superficial longitudinal y transversal. Según Badilla Vargas (2009), “la regularidad de la superficie de ruedo para la circulación de los vehículos permite ofrecer condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las carreteras” (p.30).
- Tiene que ser durable para el período de diseño establecido.
- El pavimento debe presentar óptimas condiciones de drenaje. De acuerdo a Borbón Sepúlveda y González Torres (2012), “la humedad tiene una gran influencia sobre las propiedades de los materiales que constituyen el paquete estructural y sobre el comportamiento de los pavimentos en general” (p. 52).
- El ruido de rodadura tiene que ser apropiado para los usuarios en el interior y exterior del vehículo, por lo que, Miró Recasens (2006) afirma que la irregularidad superficial y la mega textura repercuten negativamente en el incremento del ruido de rodadura.
- Tiene que ser accesible económicamente.
- Se debe evitar deslumbramientos y reflejos mediante un adecuado color de la capa de rodadura, generando seguridad a los usuarios.

1.3. Factores importantes para el diseño de pavimentos

Existen varios factores relevantes que son analizados a mayor detalle en capítulos posteriores, por lo que, en esta sección se realizará una descripción general.

1.3.1. El tráfico

El tráfico es una de las variables más importantes en el diseño de pavimentos; de este factor depende el espesor de la estructura de pavimento, por lo que, es necesario obtener información con relativa y suficiente precisión para realizar una planificación y diseño óptimo (MTC, 2013).

Desde el punto de vista de Rondón Quintana y Reyes Lizcano (2015), “esta variable es difícil de establecer y caracterizar, ya que los vehículos que circulan por una vía presentan diferentes magnitudes, configuraciones de ejes, presiones de inflado, velocidad de circulación y número de llantas” (p. 522).

El tráfico se caracteriza a través del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que transitan en un carril (Rondón y Reyes, 2015). De acuerdo al Manual de carreteras realizado por el MTC (2013), “los Ejes Equivalentes (EE) son factores de equivalencia que representan el factor destructivo de las distintas cargas, por tipo de eje que conforman cada tipo de vehículo pesado, sobre la estructura del pavimento” (p. 78).

El número de ejes equivalentes está en función del tráfico futuro y tráfico inicial, período de diseño, factor de conversión de ejes que depende del tipo de vehículo y del factor de distribución de tráfico que depende del carril de diseño.

1.3.2. La subrasante

Otra variable relevante en el diseño de pavimentos es la subrasante; de acuerdo al Manual de Carreteras realizado por el MTC (2013), “la Subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado” (p. 23).

Es el terreno natural de cimentación que tiene que resistir las cargas ocasionadas por el tránsito, la acción de las condiciones ambientales y proveer un soporte uniforme a la estructura de pavimento, por lo que, de esta capa depende en gran medida el espesor del pavimento (Rondón y Reyes, 2015).

Frost et al. (s.f.) define que la subrasante en un pavimento debe satisfacer tres funciones especialmente: resistir un limitado número de vehículos durante la fase de construcción, proporcionar una adecuada cimentación para compactar las capas de la estructura y suministrar un apropiado soporte a las cargas aplicadas por el tránsito durante su vida útil (presentar alta resistencia al ahuellamiento y debe tratar de no provocar fatiga en las capas ligadas del pavimento) (citado en Rondón y Reyes, 2015).

En este sentido, es necesario ejecutar un estudio de suelos para establecer las características físico-mecánicas de los materiales que componen la subrasante, por lo que se debe realizar exploraciones por medio de pozos o calicatas de mínimo 1.5m de profundidad que se ubicarán longitudinalmente de forma alternada; además, los suelos tienen que ser clasificados por medio de la SUCS y AASHTO (MTC, 2013).

Por medio del estudio de suelo y para realizar el dimensionamiento de la estructura de pavimento, se caracteriza la subrasante a través de la relación CBR (*Californian Bearing Ratio*), del módulo de reacción de la subrasante (K) o del módulo resiliente (Mr), dependiendo del tipo de estructura que se diseñe y del método que se utilice (Rondón y Reyes, 2015). Por lo tanto, es recomendable ubicar las capas de la estructura de pavimento sobre una subrasante con un CBR mínimo establecido por la norma de cada país.

Sin embargo, si el CBR es menor al impuesto, se debe realizar un mejoramiento o sustitución de una parte de la capa de la subrasante por un material adecuado para evitar posteriores daños de la estructura de pavimento antes de la finalización de su vida útil. Según Rondón y Reyes (2015), sobre plataformas con CBR bajos, los procesos de compactación de capas granulares o asfálticas se dificultan y pueden generar fallos estructurales que se observarán en el corto plazo” (p. 522).

1.3.3. Los materiales

Los materiales juegan un papel importante dentro del diseño de un pavimento, por lo que estos tienen que cumplir con los requerimientos mínimos establecidos en las especificaciones técnicas del proyecto (MTC, 2013).

Los pavimentos están formados por diferentes materiales en sus capas. A decir de Gutiérrez de López (2003), “los agregados utilizados en cada capa deben ser de mejor calidad a medida que se acerca a la superficie, porque los esfuerzos producidos por los vehículos son altos en la capa de rodadura” (p. 27).

Los pavimentos están conformados por las capas de base y subbase, que están compuestas por materiales pétreos y por la capa de rodadura que se elabora con materiales pétreos y asfalto para el pavimento flexible y con concreto para el pavimento rígido (Gutiérrez de López, 2003).

La base y la subbase en el pavimento flexible tienen la función de absorber y transmitir los esfuerzos en capacidad controlada y suministra un adecuado drenaje; mientras que, en el pavimento rígido, por lo general, se utiliza solamente la subbase que ayuda a controlar los cambios de volumen, previene la salida de finos por las juntas generadas por el agua y proporciona un drenaje adecuado (Gutiérrez de López, 2003).

Es por esto que, la determinación de las características mecánicas de los materiales que formarán las capas estructurales y la subrasante, deben realizarse en las condiciones más críticas de servicio; además, se debe garantizar la permanencia de las propiedades físicas, volumétricas y mecánicas a través de pruebas de durabilidad (Secretaría de Estado en los Despachos de Obras Públicas, Transporte y Vivienda. Dirección General de Carreteras de la República de Honduras, 1996).

1.3.4. El clima

Para un adecuado diseño de pavimento se debe considerar las características climáticas, tales como:

- La temperatura es un parámetro importante, debido a que afecta directamente la deformación de la carpeta asfáltica, pues, genera tensiones (MTC, 2013).
- “Las temperaturas bajas tienen influencia en la aparición del agrietamiento por fatiga la que se potencia con el ahuellamiento; por otra parte, las temperaturas altas tienen influencia en el ahuellamiento de la carpeta asfáltica” (MTC, 2013, p. 91).

- Los pavimentos rígidos se levantan las esquinas hasta su rompimiento por las diferencias de fuertes temperaturas (MTC, 2013). A continuación, un mapa zonificado de la temperatura media anual en el Ecuador:

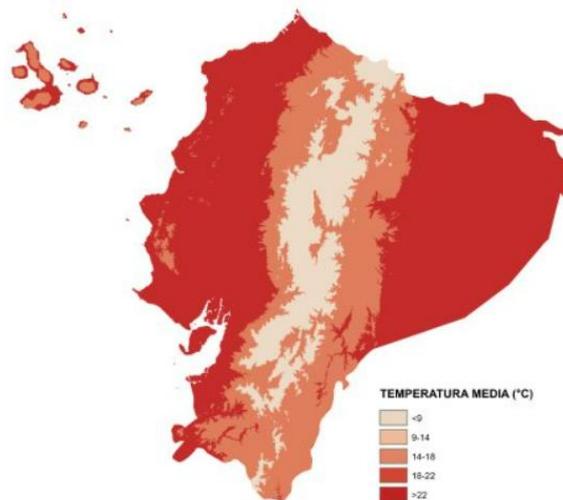


Figura 1.1. Rangos de temperatura media anual registrados en el Ecuador

Nota. Las partes bajas como la Costa, Oriente y Galápagos son las zonas más calientes; mientras que, los páramos andinos de la Sierra son las zonas más frías. *Fuente:* Varela y Ron (2020).

- Las lluvias afectan en gran medida los requerimientos del diseño de las capas granulares, debido a su presencia sobre la superficie de la vía y su percolación hacia el interior del pavimento (MTC, 2013).
- La presencia de agua en el interior de los materiales que forman las capas o en la superficie del pavimento genera cambios en las propiedades técnicas al interactuar con el viento, la temperatura, la radiación solar, entre otros (MTC, 2013).
- Las lluvias afectan directamente la elevación del nivel freático, lo que influye en la resistencia, la compresibilidad y los cambios volumétricos, especialmente, de los suelos de la subrasante (Montejo Fonseca, 2006).
- “Un nivel freático alto cercano a las capas superiores de la subrasante de diseño del proyecto, pueden desestabilizarlas por el fenómeno de la capilaridad del material utilizado” (MTC, 2013, p. 92). A continuación, un mapa zonificado de la precipitación anual en el Ecuador:

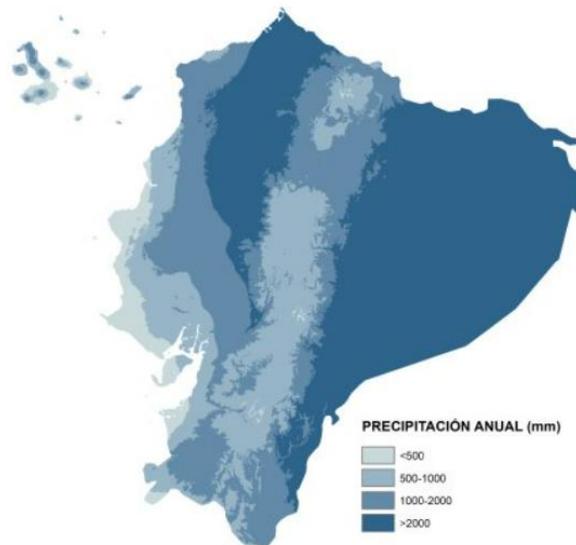


Figura 1.2. Precipitación anual registrada en el Ecuador

Nota. En las estribaciones de los Andes se encuentran las zonas con más lluvia; mientras que, en los valles interandinos y la región costa centro y sur corresponden a las zonas más secas. *Fuente:* Varela y Ron (2020).

1.4. Características superficiales de los pavimentos

Usualmente, al diseñar un pavimento se presta demasiada importancia a su función estructural, dejando a un lado su calidad en el aspecto funcional; pero, la funcionalidad es fundamental a medida que los usuarios y la comunidad exigen una mayor calidad y bienestar en las vías.

Higuera Sandoval (2015) se refiere a que las características superficiales de los pavimentos (CSP) son las únicas características del firme que realmente le interesan al usuario, porque de ellas depende en mayoría la seguridad y confort de la circulación vehicular. En algunas situaciones, las CSP incurren en los costos de funcionamiento, lo cual, afecta también a la comunidad. Además, señala que las CSP no suelen presentar una relación directa con la resistencia estructural del pavimento. Según Cano Becerril (2006), entre algunas características y propiedades están:

- Resistencia al deslizamiento
- Regularidad superficial
- Textura
- Características ópticas
- Proyecciones de agua en tiempo de precipitaciones
- Desgaste de los neumáticos

- Ruido de rodadura
- Deterioros superficiales
- Resistencia a la rodadura

1.4.1. Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento es una fuerza que se desarrolla entre la superficie del pavimento y los neumáticos, los cuales están impedidos para rotar, se deslizan a lo largo de la superficie del pavimento. Esta característica es medida por los usuarios de acuerdo a la seguridad que brinda la carretera.

Según Higuera Sandoval (2015), “El fenómeno se explica por el “principio de inercia”, o resistencia que oponen los cuerpos para variar su estado de reposo o movimiento en que se encuentran” (p. 334). Basado en este principio, hay una fuerza que permite modificar sea la velocidad o a su vez la dirección de un cuerpo que está en movimiento. También, para este autor, “la máxima fuerza aplicable sin que se produzca deslizamiento, depende de la magnitud del roce que se establece entre los neumáticos del vehículo y la carpeta de rodadura (Higuera Sandoval, 2015, p. 334).

La resistencia al deslizamiento que tiene la superficie de rodadura de un firme, está en función del coeficiente de fricción (μ). El coeficiente se calcula mediante la razón entre la fuerza de fricción (F_r), y la fuerza normal a la superficie que se origina por el peso del vehículo. El valor de μ puede ser variable y depende de algunos factores, tales como:

- Peso del vehículo
- Velocidad
- Tipo de pavimento
- Estado del pavimento
- Estado de los neumáticos
- Humedad del pavimento

En resumen, la característica de la resistencia al deslizamiento se ve afectado por varios factores que se pueden agrupar de la siguiente manera:

- Textura de la superficie del pavimento

- Características de los neumáticos
- Condiciones de operación del vehículo

1.4.2. Regularidad superficial

La regularidad superficial es una característica que se mide a través del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), el cual, “se define como la transformación matemática de un verdadero perfil de rugosidad a un estándar establecido” (Higuera Sandoval, 2015, p. 348).

De acuerdo con Kraemer Heilperno & Alonso Del Val (1996), el IRI en algún punto de una vía se precisa como la razón entre el desplazamiento relativo acumulado por la suspensión del vehículo tipo y la distancia recorrida por dicho vehículo. Este valor se expresa en milímetros por metro o en metros por kilómetro. Valores menores a 2mm/m en carreteras de primer orden, representan una excelente regularidad superficial. Además, para carreteras secundarias, y velocidades específicas alrededor de los 80km/h, el IRI puede llegar a valores de hasta 5mm/h.

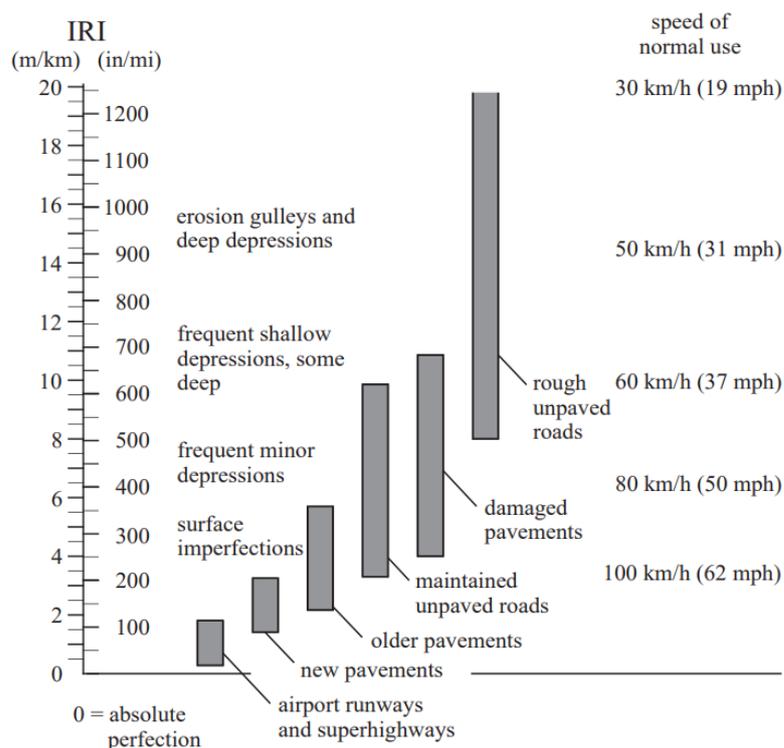


Figura 1.3. Cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías, en una escala estándar establecido por el Banco Mundial

Fuente: Sayers & Karamihas (1998).

Esta característica está asociada al confort que reciben los usuarios durante la circulación. Los defectos de la regularidad superficial cambian la relación entre neumáticos y

firmes llegando a impedir el uso de toda la adherencia que ofrece el pavimento, a pesar de encontrarse en buenas condiciones (Higuera Sandoval, 2015).

La capa de rodadura no deberá mostrar ningún tipo de resalto u ondulaciones que generen dentro del vehículo en circulación, algún tipo de aceleraciones que afecten a los usuarios. Por simplicidad, se verifica solo la regularidad del perfil longitudinal y transversal, a pesar de que sea un problema tridimensional. Las causas de cabeceos en los vehículos en movimiento son debido a la falta de regularidad superficial en el perfil longitudinal, tanto que, la falta de regularidad transversal causa su balanceo (Cano Becerril, 2006).

1.4.3. Textura superficial del pavimento

La capa de rodadura de una vía está conformada por el conjunto de materiales pétreos más el cemento o ligante bituminoso; entonces, la textura superficial depende del tipo de pavimento, como:

- Pavimentos rígidos: la textura está en función de las características del hormigón y del tratamiento superficial aplicado.
- Pavimentos flexibles: la textura se encuentra en función de las características y exposición de los agregados en la capa superficial.

Además, hay dos tipos de irregularidades superficiales llamadas rugosidad geométrica:

- La microtextura: característica inherente de los agregados; posee un grado que usualmente no se puede distinguir a simple vista. Esta interviene en la adherencia entre el neumático y pavimento, es decir, en la resistencia al deslizamiento. Existen dos tipos de microtextura, pulida y áspera, las cuales están en función de la resistencia al pulimento de los pétreos utilizados (Higuera Sandoval, 2015).
- La macrotextura: se muestra debido a las técnicas de construcción utilizadas. Esta brinda resistencia al deslizamiento siempre y cuando los vehículos circulen a altas velocidades sobre pavimentos mojados. La macrotextura se puede diferenciar entre profunda, media y lisa; también, facilita el drenaje y deslizamiento de los volúmenes de agua entre el neumático y el pavimento (Higuera Sandoval, 2015).

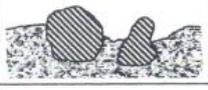
SUPERFÍCIE		SEGÚN ESCALA DE LA	
		MACROTEXTU	MICROTEXTU
A		RUGOSA	ÁSPERA
B		RUGOSA	PULIDA
C		LISA	ÁSPERA
D		LISA	PULIDA

Figura 1.4. Clasificación de los pavimentos atendiendo a su macrotextura y microtextura superficial
Fuente: Cano Becerril (2006).

1.4.4. Características ópticas

Desde un punto de vista de comodidad como de seguridad, es necesario establecer características ópticas que nos permitan una buena apreciación, en el día y en la noche, de los probables obstáculos y señales en la carretera.

Como señala Cano Becerril (2006) existen estudios realizados en diversos países, que concluyen que para intensidades de tráfico iguales:

- El índice de accidentes en la noche va del orden de 2 a 3 veces superior al del día.
- Los accidentes que ocurren en el día son menos graves que los que ocurren en la noche.

La incidencia entre la gravedad y el número de accidentes se mayor negativamente cuando a la noche se le agrega condiciones climáticas desfavorables.

Si se realiza una comparación entre las características ópticas entre una carretera seca y otra húmeda existen grandes diferencias. De acuerdo a la *figura 1.5* cuando la carretera se encuentra seca, la reflexión se efectúa de una forma difusa; mientras que, si la carretera se encuentra mojada, funciona como un espejo, cambiando de una reflexión difusa a una especular, lo cual, incurre negativamente en la visibilidad, mostrando que una vía que presente un buen drenaje superficial, además de ayudar a la adherencia, incrementa claramente sus características óptimas. Un caso muy favorable es el de las mezclas porosas, debido a que presentan un buen drenaje y adherencia (Cano Becerril, 2016).

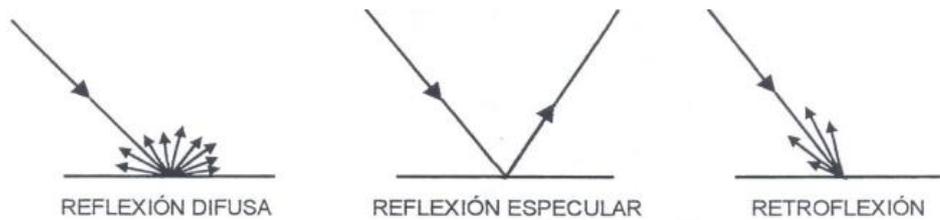


Figura 1.5. Principales modos de reflexión de la luz
Fuente: Cano Becerril (2006).

1.5. Tipos de pavimentos

Los pavimentos pueden ser clasificados en: pavimentos flexibles, pavimentos semirrígidos o semiflexibles, pavimentos rígidos y pavimentos articulados. A continuación, se los explica a mayor detalle.

1.5.1. Pavimentos flexibles

Son estructuras conformadas por una superficie asfáltica apoyada sobre capas no rígidas, la base y la subbase, que están compuestas por materiales granulares que se soportan sobre el terreno natural; estas capas deben resistir la influencia del ambiente. De acuerdo a la *figura 1.6*, las tensiones que se generan por las cargas vehiculares se disipan a través de cada capa que conforma la estructura del pavimento, de tal manera que al llegar al suelo subrasante; por lo tanto, la resistencia mecánica del pavimento debe ser capaz de resistir los esfuerzos sin generar deformaciones que promuevan el deterioro estructural o funcional de la carretera (Rondón y Reyes, 2015).

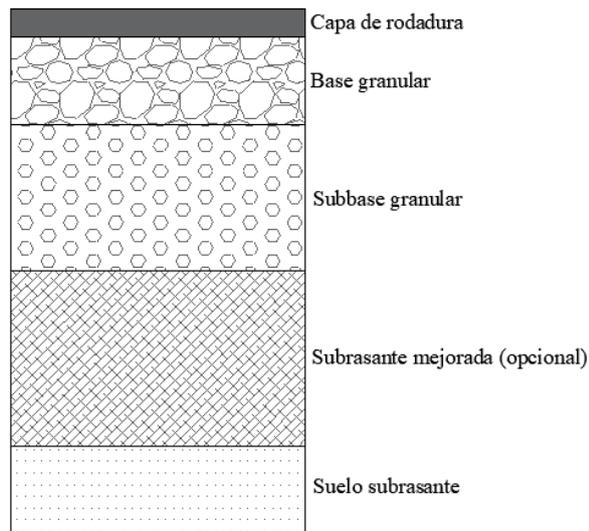


Figura 1.6. Estructura típica de un pavimento flexible
Fuente: Elaboración propia (2022), adaptada de Rondón y Reyes (2015).

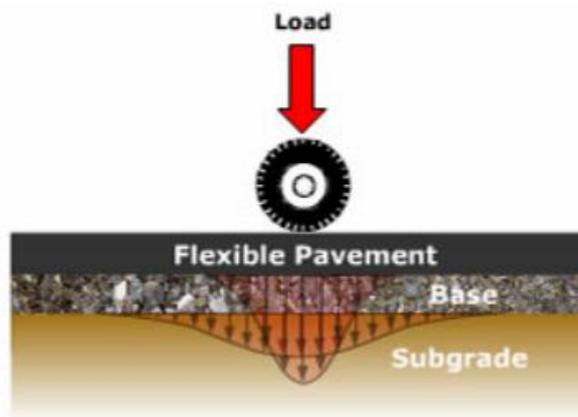


Figura 1.7. Distribución de las cargas en el pavimento flexible
Nota: Las cargas del tráfico se disipan, es decir, llegan de una manera amortiguada a la subrasante natural. *Fuente:* Cano Becerril (2006).

Funciones de las capas de un pavimento flexible

Subbase granular:

- **Economía:** el espesor total que se necesita para que los esfuerzos que tiene que soportar la subrasante sea menor o igual que su resistencia, puede ser construido con materiales de mayor calidad; no obstante, es mejor utilizar estos materiales en capas superiores y en capas inferiores; se puede trabajar con materiales de menor calidad ya que estas capas suelen ser más económicas. Esta solución nos

lleva a aumentar el espesor total del pavimento, haciéndolo más barato (Montejo Fonseca, 2006).

- Capa de transición: esta capa frena la penetración de los agregados que forman la base y la subrasante, además, opera como filtro de la capa de base impidiendo que los finos del suelo la contaminen, disminuyendo su calidad (Montejo Fonseca, 2006).
- Resistencia: a decir del autor Montejo Fonseca (2006), esta capa granular debe soportar los esfuerzos transmitidos por las capas principales y, a su vez, ser transmitidos a un nivel óptimo a la capa subrasante.

Base granular:

- Economía: el espesor total que se necesita para que los esfuerzos que tiene que soportar la subrasante sea menor o igual que su resistencia, puede ser construido con materiales de mayor calidad; no obstante, es mejor utilizar estos materiales en capas superiores; y, en capas inferiores, se puede trabajar con materiales de menor calidad, ya que estas capas suelen ser más económicas. Esta solución nos lleva a aumentar el espesor total del pavimento haciéndolo más barato (Montejo Fonseca, 2006).
- Capa de transición: esta capa frena la penetración de los agregados que forman la base y la subrasante, además, opera como filtro de la capa de base impidiendo que los finos del suelo la contaminen, disminuyendo su calidad (Montejo Fonseca, 2006).
- Resistencia: a decir del autor Montejo Fonseca (2006), esta capa granular debe soportar los esfuerzos transmitidos por las capas principales y, a su vez, ser transmitidos a un nivel óptimo a la capa subrasante.

Carpeta asfáltica:

- Superficie de rodamiento: la capa de rodadura debe brindar una superficie uniforme y estable para el tráfico; además, debe proveer un color y textura óptimo y resistir los efectos abrasivos generados por los vehículos.
- Impermeabilidad: Debe impedir el paso del agua hacia las capas inferiores.
- Resistencia: Presenta resistencia a la tensión lo que ayuda a la capacidad estructural del pavimento.

1.5.2. Pavimentos semirrígidos

Este tipo de pavimentos conservan originalmente la misma estructura de un pavimento flexible, es decir, se conforma por una superficie asfáltica sostenida por una capa rigidizada por materiales cementantes artificiales como: asfalto, cal, cemento, emulsión, entre otros. Esta capa, a su vez, se soporta sobre capas granulares no tratadas de subbase y subrasante que puede o no ser mejorada (Rondón Quintana y Reyes Lizcano, 2015).

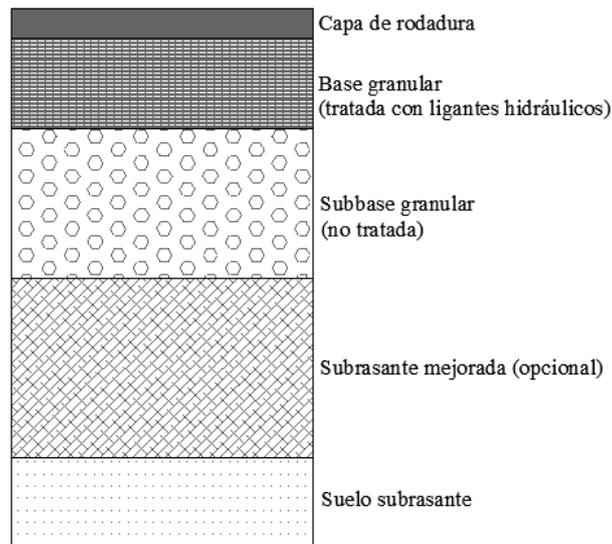


Figura 1.8. Estructura típica de un pavimento semirrígido
Fuente: Elaboración propia (2022), adaptada de Rondón y Reyes (2015).

1.5.3. Pavimentos rígidos

Como señala Rondón y Reyes (2015), esta estructura está conformada por una losa de hormigón hidráulico de 18 a 30 cm de espesor y se soporta sobre una capa granular no tratada o también puede ser estabilizada con algunos cementantes hidráulicos. Debido a la alta rigidez del hormigón, así como su elevado valor del módulo elástico, los esfuerzos generados por el tráfico son aliviados en flexión por la losa de concreto, y los esfuerzos de compresión se producen en una zona muy amplia como se muestra en la figura 1.10 y se transfieren a la subrasante en magnitudes pequeñas.

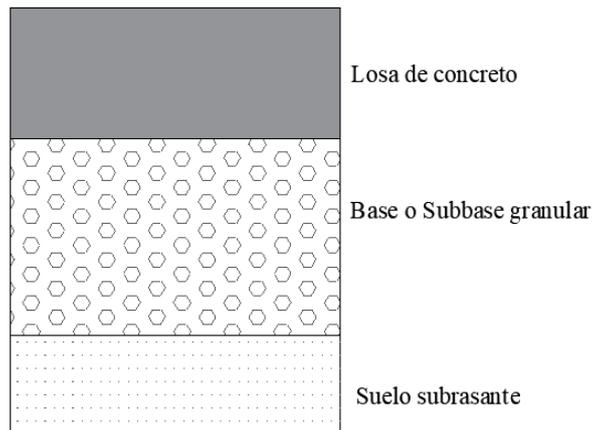


Figura 1.9. Estructura típica de un pavimento rígido
Fuente: Elaboración propia (2022).

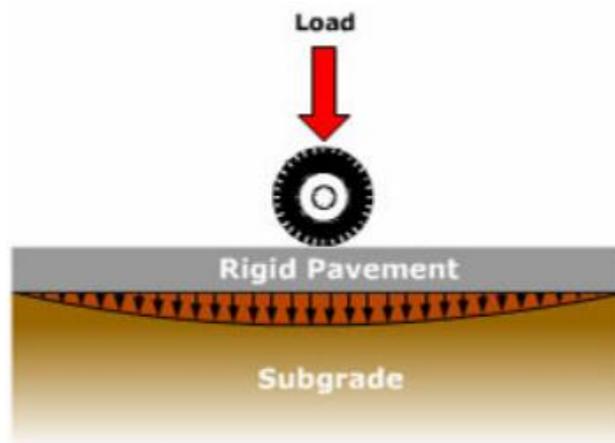


Figura 1.10. Distribución de las cargas en el pavimento rígido

Nota: Las cargas producidas por los vehículos, se distribuyen en casi toda el área del subsuelo, la losa de concreto presenta la mayor capacidad estructural con respecto a las otras capas. *Fuente:* Cano (2006).

Funciones de las capas de un pavimento rígido

Subbase granular:

- El objetivo fundamental es impedir la acción del bombeo de las grietas, extremos del firme y las juntas. El bombeo es la fluencia de agregado fino con agua fuera del pavimento, dado por la infiltración de agua por las juntas de la losa (Montejo Fonseca, 2006).
- Ayudar a reducir el agua de infiltración ya que mejora el drenaje.
- Aprovechar como una capa de transición y proveer un apoyo estable y uniforme del pavimento.

Losa de hormigón:

Según Montejo Fonseca (2006), esta capa de losa de hormigón presenta las mismas funciones que la capa asfáltica del pavimento flexible, además de una función estructural extra que es la de recibir y transmitir en nivel óptimo las cargas que se le apliquen a las capas inferiores.

1.5.4. Pavimentos articulados

Este tipo de pavimento está compuesto por una superficie de rodadura que está construida con elementos individuales rígidos prefabricados llamados adoquines, que pueden ser de arcilla o cemento, que son iguales entre sí y se unen por un material sellante. Esta capa puede estar sobre una capa fina de arena, la cual, también se sostiene sobre una capa de base o subbase granular o directamente sobre el suelo natural que puede o no ser mejorado, dependiendo de las condiciones del mismo (Rondón y Reyes, 2015).

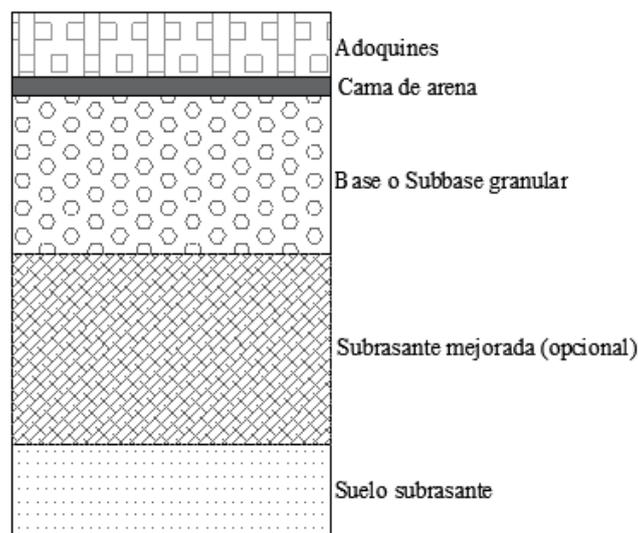


Figura 1.11. Estructura típica de un pavimento articulado
Fuente: Elaboración propia (2022).

Funciones de las capas de un pavimento articulado

Base granular:

Se encuentra ubicada entre la capa de rodadura y el suelo subrasante. Esta capa ayuda a incrementar la resistencia estructural y, a su vez, le da un mayor espesor al pavimento. Puede estar formada por dos o más capas de elementos seleccionados.

Cama de arena:

Esta capa se coloca sobre la base granular y sirve de asiento para los adoquines y como filtro para el agua que, en ocasiones, se infiltra por las juntas.

Adoquines:

Estos elementos deben presentar la resistencia óptima para soportar las cargas que emiten los vehículos y, sobre todo, por el desgaste producido.

Sello de arena:

Este material de consistencia fina, es colocado entre las juntas de los adoquines como sellante, y ayuda a que la capa de rodadura se considere como un todo.

1.6. Métodos de diseño**1.6.1. Métodos de diseño para pavimentos flexibles*****Método del Instituto del Asfalto***

En este método de diseño se puede utilizar asfalto sólido o emulsiones asfálticas; se permite realizar diferentes combinaciones, tales como: capa de rodadura y bases de concreto asfáltico; capa de rodadura y bases con emulsiones asfálticas, y capas de rodadura asfálticas con base y subbase granulares (Montejo Fonseca, 2006).

Desde el punto de vista de Montejo Fonseca (2006), este método considera al pavimento como un sistema elástico de varias capas. Para su análisis se emplean gráficas que permiten la aplicación del método de forma rápida. Existen diferentes variables que son relevantes para el diseño mediante este método. A continuación, se mencionan brevemente las principales de acuerdo a Montejo Fonseca (2006):

- El tránsito: se debe realizar el análisis del tránsito para definir el número y peso de las cargas por eje que se van a aplicar al pavimento durante su período de diseño.
- Suelos de subrasante: es importante conocer la resistencia de la subrasante que se determina a través del módulo de resiliencia (M_r); este valor se establece a partir de correlaciones con los métodos normales como el CBR.

- Materiales para construcción de pavimentos: para la capa de rodadura se puede utilizar mezclas asfálticas del tipo concreto asfáltico y, en alguno de sus casos, un tratamiento superficial doble.

Las bases pueden ser estabilizadas con emulsiones asfálticas que se dividen en tres tipos de mezclas respectivamente: agregados procesados densamente graduados con emulsiones asfálticas, agregados semiprocesados de trituración, bancos o carreteras con emulsiones asfálticas y arenas o arenas limosas con emulsiones; también, se pueden utilizar bases en concreto asfáltico.

Para realizar el diseño de pavimento se tiene que estimar el tránsito para obtener el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas; determinar la resistencia de la subrasante y elegir la capa de rodadura y los tipos de base que se va a utilizar en la construcción del pavimento. Finalmente, mediante las gráficas que establece el método se calcula los espesores de las diferentes capas de la estructura (Montejo Fonseca, 2006).

A continuación, una gráfica del diagrama de diseño para el cálculo del espesor de pavimento que corresponde a la emulsión tipo I, que se encuentra en función del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas y del módulo resiliente de la subrasante.

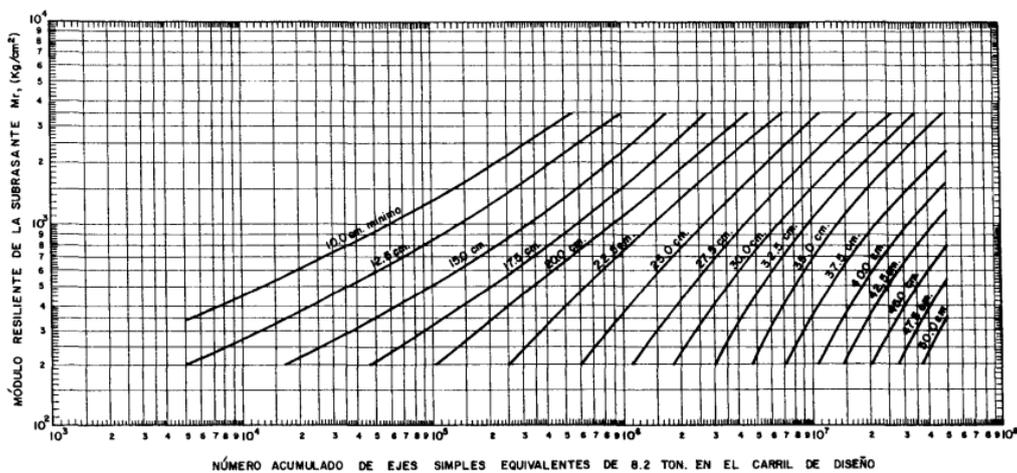


Figura 1.12. Diagrama de diseño para base estabilizada con emulsión tipo I

Nota. En la presente gráfica la emulsión tipo I corresponde a la mezcla de emulsiones asfálticas con agregados procesados densamente graduados. Fuente: Montejo Fonseca (2006).

Método AASHTO 93

Cano Becerril (2006) plantea:

La ecuación original de regresión obtenida a partir de los resultados de la prueba realizada por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 1993) ha sido modificada, principalmente en los valores de las constantes de regresión, con base en la teoría y la experiencia (p.117).

Según la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 1993), la ecuación para pavimentos flexibles es la siguiente:

Ecuación 1.1. Ecuación de la AASHTO 93 para pavimentos flexibles

$$\log_{10}W_{18} = Z_R S_0 + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \left[\frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}} \right]} + 2.32 \log_{10} M_r - 8.07$$

Donde:

W_{18} : número admisible de ejes equivalentes de 8.2 toneladas

Z_R : desviación normal estándar

S_0 : desviación normal integral

SN: número estructural del pavimento. $(a_1d_1 + a_2d_2m_2 + a_3d_3m_3)$

a_i : Coeficiente estructural de la capa i

d_i : espesor de la capa i

m_i : coeficiente de drenaje de la capa i

ΔPSI : diferencia entre los índices de servicio inicial y terminal

M_r : módulo de resiliencia (PSI)

En el siguiente capítulo se explicará más a detalle este método, ya que es el que se utilizará para el diseño estructural de pavimentos flexibles

Método Shell

El método Shell se consideraría un método de tipo racional, ya que “considera la estructura del pavimento (capa asfáltica, capas granulares y subrasante), como un sistema multicapa linealmente elástico, en el cual los materiales se encuentran caracterizados por su módulo de elasticidad de Young (E) y su relación de Poisson (μ)” (Montejo, 2006, p. 360). Al respecto, se debe indicar que los materiales que se encuentran en la estructura son considerados

como homogéneos e isotrópicos; además, se debe suponer que las capas que la componen tienen una extensión infinita en sentido horizontal. “El tránsito se expresa en términos de ejes simples equivalentes de 8.2 toneladas, aplicadas por medio de sistemas de rueda doble con un área de contacto circular con diámetro de 210 mm” (Montejo, 2006, p. 360)

Según este método, el pavimento puede fallar por uno de dos motivos principales:

- Que la deformación unitaria horizontal por tracción (ε_T) en la fibra inferior de las secciones de asfalto, al flexionar ellas bajo el ejercicio de las cargas, rebase cierto límite aceptable.
- Que la deformación unitaria vertical por compresión (ε_V) del suelo subrasante supere el límite admitido por el mismo, en donde se provoca su deformación permanente y por ende la del pavimento (Montejo Fonseca, 2006).

A decir del autor, la aplicación de este método se basa en adoptar una combinación de espesores y características de los materiales de las diferentes capas del pavimento, de modo que las deformaciones, por tracción y compresión (horizontal y vertical) se encuentren dentro de los límites admisibles durante el período de diseño elegido. Los valores permisibles de las deformaciones horizontales y verticales, se han encontrado a través de varias investigaciones en campo y laboratorio, las que demuestran que la deformación horizontal y la deformación vertical son inversamente proporcional al tránsito tal como se expresa en las siguientes fórmulas:

$$\varepsilon_T = a \left(\frac{1}{N} \right)^b$$
$$\varepsilon_V = c \left(\frac{1}{N} \right)^d$$

Donde:

ε_T : deformación por tracción horizontal

ε_V : deformación vertical por compresión

N: Número de repeticiones de carga

a,b,c,d: Coeficientes determinados por experiencias de campo y laboratorio

A partir de estos conceptos y usando un complejo programa de cálculo de esfuerzos y deformaciones en sistemas elásticos multicapa, la Shell ha realizado un programa de cómputo llamado BISAR, mediante el cual, conociendo las características de los materiales y asumiendo

espesores de las diversas capas del pavimento, se puede computar la magnitud de las deformaciones ε_T y ε_V . (Montejo, 2006, p. 362).

La Shell ha realizado algunas gráficas para aplicar en el diseño de pavimentos a partir del programa mencionado anteriormente.

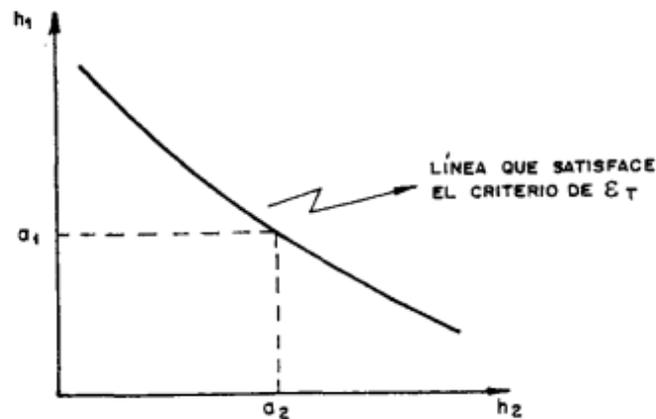


Figura 1.13. Curva que devuelve el criterio de deformación horizontal en la fibra inferior de las capas asfálticas

Nota. En la figura se muestra una combinación de espesores de las secciones de asfalto (h_1) y de las capas granulares (h_2) que satisfacen el criterio de deformación por tracción. Fuente: Montejo Fonseca (2002).

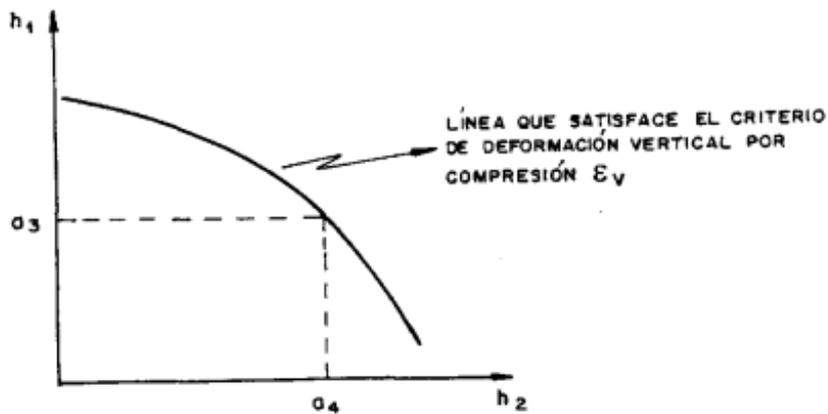


Figura 1.14. Curva que devuelve el criterio de deformación vertical en subrasante

Nota. En la figura se muestra una combinación de espesores de las secciones de asfalto (h_1) y de las capas granulares (h_2) que satisfacen el criterio de deformación por compresión. Fuente: Montejo Fonseca (2002).

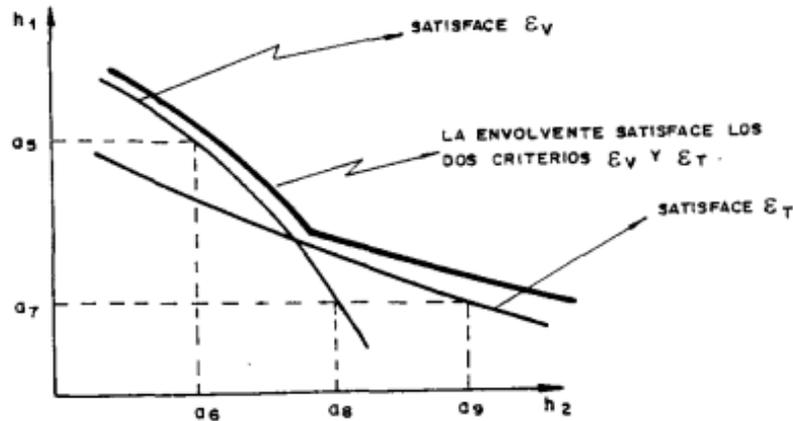


Figura 1.15. Envolvente que satisface a la par la deformación horizontal (ϵ_T) y la deformación vertical (ϵ_V)
 Nota. Se observa la combinación de las dos curvas de deformación, las que forman una envolvente necesaria para el diseño óptimo de las secciones estructurales del pavimento. Fuente: Montejo Fonseca (2002).

Además, los parámetros más importantes a considerar para el diseño de las estructuras de pavimento son:

- Tránsito.
- Temperatura.
- Propiedades de la subrasante, subbase y base.
- Características de la mezcla asfáltica.

Método del cuerpo de ingenieros

La Secretaría de Estado en los Despachos de Obras Públicas, Transporte y Vivienda (SOPTRAVI, 1996) establece que este método es considerado de base empírica o llamado también el Método CBR, para la elección del CBR de diseño, se requiere que los ensayos de compactación se realicen con tres energías diferentes, y que las probetas conformadas en esas situaciones volumétricas sean analizadas al CBR. Según a un intervalo de humedad indicado para trabajar en campo y a los requerimientos de compactación que se ocupen se determina un rango de humedades y densidades que deben exigirse en campo.

El espesor de un pavimento puede obtenerse mediante el uso de curvas de diseño basadas en el Valor Relativo de Soporte crítico (VRS) de cada capa que conforma la estructura de pavimento como se observa en la figura 1.16. Se muestra que los espesores de las secciones pueden adquirirse para diferentes valores de VRS y diferentes cargas por rueda de los vehículos, elegidas con el criterio de carga equivalente; estos espesores corresponden a los

requeridos para 10^6 repeticiones de la carga seleccionada. Para aplicar este criterio se asume que el espesor del firme varía linealmente con el número de las repeticiones de carga, cuando este se muestra en escala logarítmica y que con un 25% del espesor solicitado para 10^6 repeticiones el pavimento se agrieta ante el resultado de una sola repetición de esa misma carga.

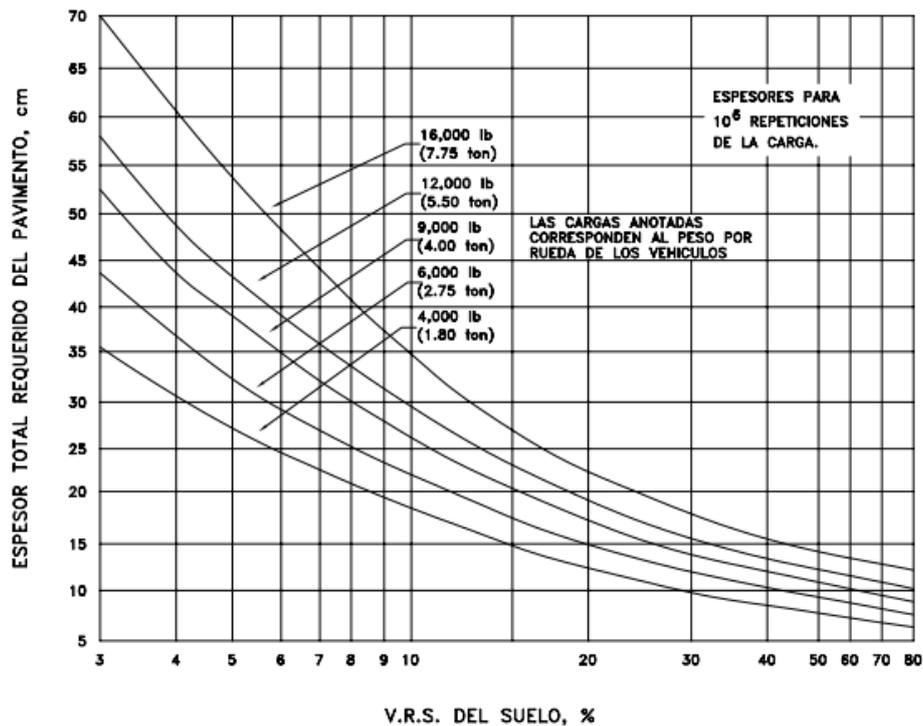


Figura 1.16. Espesores de pavimento en carreteras, en función del VRS
Fuente: SOPTRAVI (1996).

Método de la UNAM

En México, los ingenieros proyectistas viales cuentan con un método de diseño realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Para el desarrollo de este método se inició con el análisis de datos experimentales en tramos de prueba y carreteras en servicio, que posteriormente influyó a realizar una mejoría del mismo. En este momento, el método se lo maneja mediante gráficas, calculadoras avanzadas en sistemas de programación o programas sistemáticos (Rico Rodríguez et al., 1998).

A decir de Rico Rodríguez et al. (1998), el método asume como datos de entrada básicos el tipo de carretera, el período de diseño del proyecto, el número de carriles, el tránsito promedio diario anual, la tasa de crecimiento del tráfico y algunas otras variables sobre

particularidades del suelo y materiales, además del clima. Es necesario la estimación del Valor Relativo de Soporte crítico (VRS) mediante pruebas de campo y ensayos de laboratorio. Todo esto para comprender mejor el comportamiento de las estructuras de pavimento a diseñar, debiendo ejecutarse para cada material disponible y planteado, ensayos con tres diferentes energías de compactación; baja (Proctor estándar) intermedia y alta (Proctor modificado).

Posteriormente, se realiza el análisis y procesamiento de los datos del tránsito, partiendo con el TPDA inicial, la tasa de crecimiento en porcentaje anual y la disposición vehicular a detalle, tomando en cuenta los autos, vehículos livianos y vehículos pesados. Cabe recalcar que se toma en cuenta los porcentajes de vehículos pesados, tanto cargados con carga legal, como totalmente vacíos. Esto se realiza con el fin de obtener los coeficientes de daño a diferentes profundidades de la estructura (0m -30m), y finalmente obtener el tránsito equivalente acumulado (TEA) para cada capa del pavimento (Rico Rodríguez et al., 1998).

Finalmente, Rico Rodríguez et al. (1998) plantea que para obtener los espesores de cada sección que conforma la estructura de pavimento, es necesario revisar varios nomogramas que están en función del nivel de confianza que se prefiera, el VRS de cada capa y el TEA en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño.

1.6.2. Métodos de diseño para pavimentos rígidos

Método de la Portland Cement Association (PCA)

El método de la PCA tiene la finalidad de calcular los espesores mínimos de pavimento rígido y así generar menores costos anuales, es por eso, que se debe elegir espesores de diseño que equilibren de manera óptima los costos iniciales y los de mantenimiento (Montejo Fonseca, 2006).

Este método se aplica para los diferentes tipos de pavimentos rígidos, tales como: pavimentos de concreto simple, de concreto simple con pasadores, de concreto reforzado y con refuerzo continuo (Montejo Fonseca, 2006).

Desde el punto de vista de Montejo Fonseca (2006), el método considera las siguientes condiciones:

- El grado de transferencia de carga generado en las juntas transversales.
- El uso de bermas de concreto que reducen los esfuerzos de flexión y las deflexiones generadas por el tráfico.
- El uso de una subbase pobre que proporciona un soporte adecuado y resistencia a la erosión.

Se basa en dos criterios de diseño principales:

- El análisis de la fatiga del hormigón que protege al pavimento de la acción de los esfuerzos generados por las cargas repetidas, controlando el agrietamiento (Montejo Fonseca, 2006).

A continuación, se presenta un gráfico del análisis de fatiga:

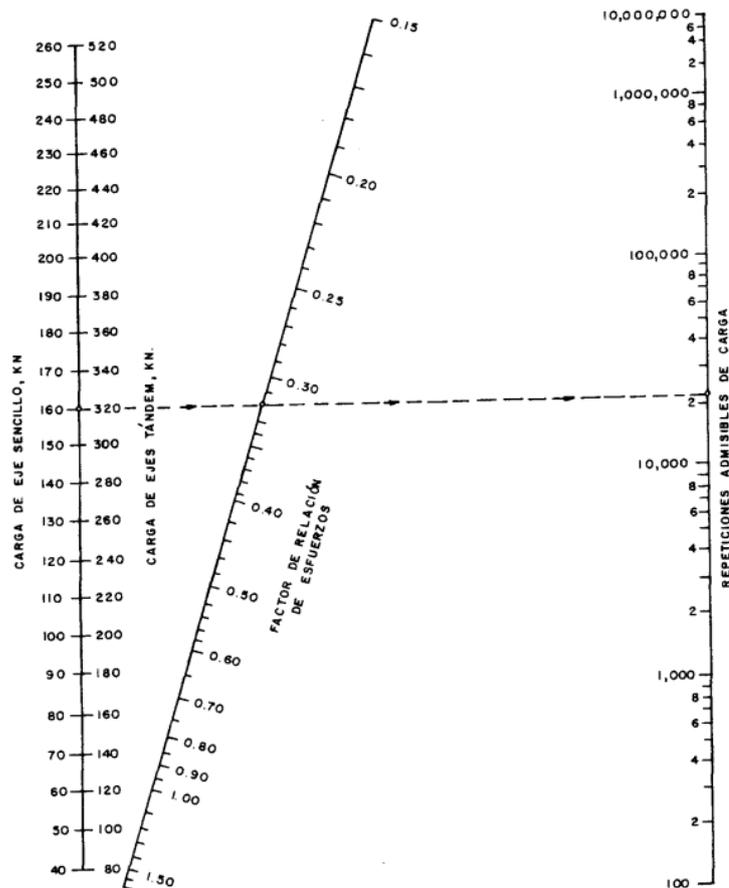


Figura 1.17. Análisis de fatiga – Repetición de carga admisible con base en el factor de relación de esfuerzos (con y sin bermas de concreto)
Fuente: Montejo Fonseca (2006).

- El análisis de la erosión que ayuda a limitar los efectos de la deflexión en los bordes de la losa, juntas y esquinas, además ayuda a controlar la erosión de fundación y de los materiales de las bermas (Montejo Fonseca, 2006).

A continuación, se presenta un gráfico del análisis de erosión

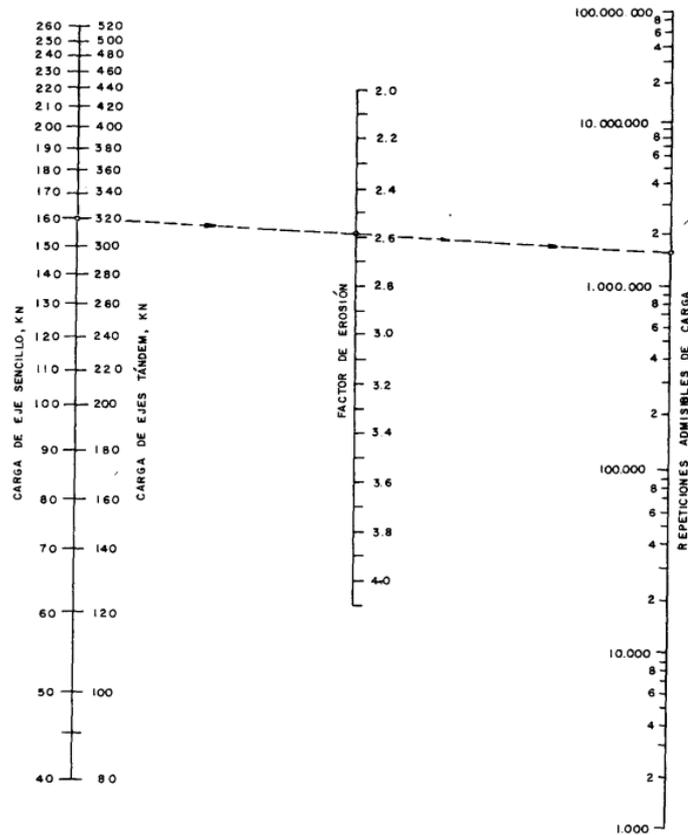


Figura 1.18. Repetición de carga admisible con base en el factor de erosión (sin berma de concreto)
Fuente: Montejo Fonseca (2006).

Para realizar el diseño se utilizan los siguientes factores fundamentales de acuerdo a Montejo Fonseca (2006):

- Módulo de rotura
- Resistencia de la subrasante y subbase
- Las cargas por eje esperadas, sus tipos, frecuencias y magnitudes
- El período de diseño

A decir de Bojorque et al. (2017), este método es un proceso iterativo en donde se asume un valor inicial y se va analizando los resultados en función del porcentaje de fatiga y erosión; estos dos factores tienen que estar cerca y no superar el 100%.

Método AASHTO 93

Se ha editado por cuarta vez la versión de la ecuación original AASHTO, en la que se incluyen los avances sobre la comprensión de la funcionalidad de los pavimentos. En conclusión, el proceso que se encuentra en la guía AASHTO determina el espesor (D) de un pavimento de hormigón para que pueda soportar una carga de W_{82} ejes equivalentes de 82 kN sin que se origine una disminución del índice de servicio ΔPSI .

Según AASHTO (1993) la ecuación para pavimentos rígidos es la siguiente:

Ecuación 1.2. Ecuación de la AASHTO 93 para pavimentos rígidos

$$\log_{10} W_{82} = Z_R S_0 + 7.35 \log_{10}(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \left[\frac{1.25 * 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}} \right]} + (4.22 - 0.32 P_t) \log_{10} \left[\frac{M_r C_{dx} (0.09 D^{0.75} - 1.132)}{1.51 * J \left(0.09 D^{0.75} - \frac{7.38}{\left(\frac{E_c}{k} \right)^{0.25}} \right)} \right]$$

Donde:

W_{82} : número previsto de ejes equivalentes de 8.2 toneladas

Z_R : desviación normal estándar

S_0 : desviación normal integral

D: espesor del pavimento de concreto (mm)

ΔPSI : diferencia entre los índices de servicio inicial y final

P_t : índice de servicio final

M_r : resistencia media del concreto (Mpa)

C_{dx} : coeficiente de drenaje

J: coeficiente de transmisión de cargas en las juntas

E_c : módulo de elasticidad del concreto (Mpa)

k: módulo de reacción de la superficie (Mpa/m)

En el siguiente capítulo se explicará más a detalle este método, ya que es el que se utilizará para el diseño estructural de pavimentos rígidos.

CAPÍTULO 2

Metodología de diseño AASHTO 93

La metodología AASHTO 93 es considerada como la guía más adecuada para el diseño de las estructuras de pavimentos flexibles y rígidos en el medio local ecuatoriano. Esta guía en sus inicios fue realizada para diseñar las vías en los Estados Unidos de América, por la conveniente metodología constructiva aplicada; cabe recalcar que es una metodología de las más utilizadas a nivel internacional por sus arduos estudios a través de los años. Hay que tener presente que se deben realizar ajustes previos según la zona geográfica en donde se aplique (Morales Espinoza & Tapia Aguilar, 2021).

2.1. Análisis de la normativa vigente y estándares nacionales e internacionales aplicables

2.1.1. Base legal

- Ministerio de Obras públicas y Comunicaciones / Normas de Diseño Geométrico de Carreteras - 2003 (MOP, 2003).
- Ministerio de Obras públicas y Comunicaciones / Especificaciones Generales para la Construcción (MOP – 001 – F 2002).
- Ley Orgánica de Transparencia y Acceso a la Información Pública / Acuerdo Ministerial No. 018-2016 (LOTAIP, 2016)
- American Association of State Highway and Transportation Officials / Guide for Design of Pavements Structures (AASHTO, 1993).

2.1.2. Especificaciones generales para el tráfico

2.1.2.1. Clasificación del tráfico

Según con la clasificación establecida por el MOP (2003), las carreteras se dividen de acuerdo al tráfico proyectado TPDA para un período de diseño de 15 o 20 años; cabe recalcar que en los rangos de tráfico se encuentran incluidos también los vehículos livianos, como se muestra en la *tabla 2.1*.

Tabla 2.1. Clasificación de Carreteras de Acuerdo al Tráfico

Clasificación de Carreteras en Función del Tráfico Proyectado	
Clase de Carretera	Tráfico Proyectado TPDA
R – I o R - II	Más de 8.000
I	De 3.000 a 8.000
II	De 1.000 a 3.000
III	De 300 a 1.000
IV	De 100 a 300
V	Menos de 100

Nota. Cuando el pronóstico de tráfico para el año 10 sobrepasa los 7.000 vehículos debe investigarse la posibilidad de construir una autopista. Para la determinación de la capacidad de una carretera, cuando se efectúa el diseño definitivo, debe usarse tráfico de vehículos equivalentes. *Fuente:* MOP (2003).

2.1.2.2. Composición del tráfico

Existen diferentes clases de vehículos que se encuentran en función de los tamaños y pesos, por lo que es importante considerar estas variaciones, debido a que los vehículos livianos y pesados generan diferentes efectos sobre el pavimento (Acuerdo Ministerial No. 018 de 2016 [LOTAIP])

Se consideran como vehículos livianos las motocicletas, automóviles, camionetas y *pickups* que tengan una capacidad de hasta ocho pasajeros con ruedas sencillas en el eje trasero; mientras que, dentro de la clasificación de los vehículos pesados se encuentran los camiones, buses y combinaciones de camiones (semirremolques y remolques) que pesen más de cuatro toneladas con doble llanta en las ruedas traseras (Acuerdo Ministerial No. 018 de 2016 [LOTAIP])

De acuerdo al Acuerdo Ministerial No. 018 de 2016 [LOTAIP] para el diseño de pavimento se consideran varios tipos de vehículos de diseño:

- Vehículo liviano (A):
A1: generalmente para motocicletas
A2: automóviles
- Buses y busetas (B)
- Camiones C:

C1: dos ejes

C2: camiones o tracto-camiones de tres ejes

C3: cuatro, cinco o más ejes

- Remolques (R): con uno o dos ejes verticales de giro y una unidad completamente remolcada, tipo tráiler o tipo Dolly

A continuación, se presentan dos tablas que corresponden a los Pesos y Dimensiones Nacionales clasificados por el tipo de vehículo motorizado remolque y semirremolque y por las posibles combinaciones:

Tabla 2.2. Nacional de Pesos y Dimensiones: Tipo de vehículos motorizados remolques y semirremolques

TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	PESO BRUTO VEHICULAR MÁXIMO PERMITIDO (toneladas)	LONGITUDES MÁXIMAS PERMITIDAS (metros)		
				Largo	Ancho	Alto
2D			7	5,50	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 OCTOPUS			34	12,20	2,60	4,10
V2DB			18	12,20	2,60	4,10
V3A			27	12,20	2,60	4,10
T2			18	8,50	2,60	4,10
T3			27	8,50	2,60	4,10
R2			14	10,00	2,60	4,10
R3			21	10,00	2,60	4,10
S1			11	13,20	2,60	4,10
S2			20	13,20	2,60	4,10
S3			24	13,20	2,60	4,10
B1			7	10,00	2,60	4,10
B2			14	10,00	2,60	4,10
B3			21	10,00	2,60	4,10

Fuente: Acuerdo Ministerial No. 018 de 2016 [LOTAIP].

Tabla 2.3. Nacional de Pesos y Dimensiones: Posibles combinaciones

TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	PESO BRUTO VEHICULAR MÁXIMO PERMITIDO COMBINADO (toneladas)	LONGITUDES MÁXIMAS PERMITIDAS (metros)		
				Longitud	Ancho	Alto
2S1			29	20,50	2,60	4,30
2S2			38	20,50	2,60	4,30
2S3			42	20,50	2,60	4,30
3S1			38	20,50	2,60	4,30
3S2			47	20,50	2,60	4,30
*3S3			48	20,50	2,60	4,30
2R2			32	20,50	2,60	4,30
**2R3			39	20,50	2,60	4,30
*3R3			48	20,50	2,60	4,30
**3R2			41	20,50	2,60	4,30
2B1			25	20,50	2,60	4,30
2B2			32	20,50	2,60	4,30
2B3			39	20,50	2,60	4,30
3B1			34	20,50	2,60	4,30
3B2			41	20,50	2,60	4,30
3B3			48	20,50	2,60	4,30

Fuente: Acuerdo Ministerial No. 018 de 2016 [LOTAIP].

2.1.3. Especificaciones generales para la estructura del pavimento

2.1.3.1. Base

Esta capa se va a construir mediante agregados procedentes de parcial o total trituración o de agregados cribados, estabilizados con agregados fino a través de trituración, suelos finos seleccionados o la combinación de los dos (Ministerio de Obras Públicas, 2002).

De acuerdo al MOP (2002), el límite líquido de la parte del material que pase el tamiz N°40 debe ser menor de 25, el índice de plasticidad menor de 6, el porcentaje de desgaste de los agregados será menor del 40% y la capacidad de soporte **CBR tiene que ser igual o mayor al 80%**.

Existen cuatro clases de bases de acuerdo a MOP (2002); a continuación, se detalla cada uno:

- Clase 1: están constituidas por agregados finos y gruesos procedentes de una trituración en un 100% y graduados uniformemente dentro de los límites granulométricos de la siguiente tabla:

Tabla 2.4. Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	
	Tipo A	Tipo B
2" (50.8 mm)	100	-
1 1/2" (38.1 mm)	70-100	100
1" (25.4 mm)	55-85	70-100
3/4" (19.0 mm)	50-80	60-90
3/8" (9.5 mm)	35-60	45-75
N°4 (4.76 mm)	25-50	30-60
N°10 (2.00 mm)	20-40	20-50
N°40 (0.425 mm)	10-25	10-25
N°200 (0.075 mm)	2-12	2-12

Fuente: MOP (2002).

- Clase 2: estas bases están conformadas por fragmentos de roca o grava triturada, en la que la fracción de agregado grueso será triturado al menos el 50% en peso y tienen que estar graduados uniformemente dentro de los límites granulométricos de la siguiente tabla:

Tabla 2.5. Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
1" (25.4 mm)	100
3/4" (19.0 mm)	70-100
3/8" (9.5 mm)	50-80
N°4 (4.76 mm)	35-65
N°10 (2.00 mm)	25-50
N°40 (0.425 mm)	15-30
N°200 (0.075 mm)	3-15

Fuente: MOP (2002).

- Clase 3: están conformadas por fragmentos de roca o grava triturada, en la que la fracción de agregado grueso será triturado al menos el 25% en peso y tienen que estar graduados uniformemente dentro de los límites granulométricos de la siguiente tabla:

Tabla 2.6. Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
3/4" (19.0 mm)	100
N°4 (4.76 mm)	45-80
N°10 (2.00 mm)	30-60
N°40 (0.425 mm)	20-35
N°200 (0.075 mm)	3-15

Fuente: MOP (2002).

- Clase 4: son constituidas por agregados obtenidos mediante trituración o cribado de piedras fragmentadas naturalmente o de gravas y tienen que estar graduados uniformemente dentro de los límites granulométricos de la siguiente tabla:

Tabla 2.7. Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
2" (50.8 mm)	100
1" (25.4 mm)	60-90
N°4 (4.76 mm)	20-50
N°200 (0.075 mm)	0-15

Fuente: MOP (2002).

2.1.3.2. Subbase

Se define como subbase a la capa granular que se encuentra entre la subrasante y la base granular en los pavimentos flexibles y a la capa que normalmente se coloca debajo del pavimento rígido. Este material está compuesto por agregados obtenidos mediante el proceso de trituración o de cribado (MOP, 2002).

Los agregados deben tener un coeficiente de desgaste máximo de 50%, según el ensayo de abrasión de los Ángeles. La parte del material que pase el tamiz N°40 tiene que poseer un índice de plasticidad menor que 6 y un límite líquido máximo de 25; además, la capacidad de soporte **CBR debe ser igual o mayor del 30%** (MOP, 2002).

De acuerdo al MOP (2002) hay tres clases de subbases. A continuación, se detalla cada uno:

- Clase 1: los agregados se obtienen mediante trituración de roca o gravas, en donde, por lo menos el 30% del agregado preparado tiene que obtenerse por el proceso de trituración.
- Clase 2: los agregados se obtienen a través de trituración o cribado en yacimientos de piedras fragmentadas naturalmente o de gravas.
- Clase 3: están construidas con agregados naturales y procesados.
-

Seguidamente, se presenta una tabla de las clases de subbases con sus respectivos límites de acuerdo a su granulometría.

Tabla 2.8. Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3
3" (76.2 mm)	-	-	100
2" (50.8 mm)	-	100	-
1 1/2" (38.1 mm)	100	70-100	-
N°4 (4.76 mm)	30-70	30-70	30-70
N°40 (0.425 mm)	0 10-35	15-40	-
N°200 (0.075 mm)	0-15	0-20	0-20

Fuente: MOP (2002).

2.1.3.3. Mejoramiento de la subrasante

Si en el proyecto se establece que es necesario colocar sobre la subrasante una capa formada con suelo seleccionado, este se puede obtener de la excavación para la plataforma del camino, de excavación de préstamo o de cualquier excavación con su respectiva autorización y aprobación por el Fiscalizador (MOP, 2002).

El suelo puede ser granular, material rocoso o una combinación de los dos, libre de escombros y de material orgánico; todas las partículas deben pasar por un tamiz de cuatro pulgadas (100 mm) con abertura cuadrada y no más del 20% pasará el tamiz N°200 (0.075) en base al ensayo AASHTO-T11 (MOP, 2002).

De acuerdo al MOP (2002) la parte del material que pase el tamiz N°40 (0.425 mm) debe tener un índice de plasticidad menor de 9 y un límite líquido hasta el 35% siempre que el valor del **CBR sea mayor al 20%**.

2.2. Variables de entrada

2.2.1. Tránsito

2.2.1.1. Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas (W_{18})

EL MTC (2013) establece que: “W18, es Número Acumulado de Ejes Simples Equivalentes a 18000lb (80 kN) para el período de diseño, corresponde al Número de Repeticiones de EE de 8.2t, el cual, se establece con base en la información del estudio de tráfico” (p. 153).

Ecuación 2.1. Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas

$$N_{8.2} = \frac{TPDA_i + Tf_n}{2} * n * 365 * FCE_{TOTAL} * Dt$$

Donde:

$N_{8.2}$: número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas

$TPDA_i$: tráfico promedio diario anual inicial

Tf_n : tráfico futuro proyectado según el período de diseño

n : período de diseño

FCE_{TOTAL} : factor de carga equivalente total para pavimentos flexibles

Dt : factor de distribución de tráfico

Nota: en el cálculo del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas ($N_{8.2}$) para el tráfico promedio diario anual inicial y el tráfico futuro proyectado no se toma en cuenta el tipo de vehículo “liviano automóvil”.

2.2.1.2. Tráfico futuro (Tf)

Según el Ministerio de Obras públicas y Comunicaciones (2003), es importante tener presente que el pronóstico que se da del volumen, así como los resultados de la composición del tráfico, estará siempre basado en el tráfico actual. “Los diseños se basan en una predicción del tráfico de 15 a 20 años y el crecimiento normal de tráfico, el tráfico generado y el crecimiento del tráfico por desarrollo” (MOP, 2003, p. 16).

Las proyecciones de tráfico se usan para obtener los datos geométricos del proyecto, elegir la velocidad de diseño y, además, clasificar las carreteras.

Ecuación 2.2. Tráfico futuro proyectado según el período de diseño

$$Tf_n = TPDA_i(1 + i)^n$$

Donde:

Tf_n: tráfico futuro proyectado según el período de diseño

TPDA_i: tráfico promedio diario anual inicial

i: tasa de crecimiento anual

n: período de diseño

Tabla 2.9. Tasas de crecimiento por tipo de vehículo y para el período de vida útil del proyecto para el Azuay

Periodo	Livianos	Buses	Camiones
2018-2020	5.98	2.27	4.45
2020-2025	5.16	1.96	4.07
2025-2030	4.51	1.72	3.67
2030-2035	3.99	1.51	3.33
2035-2040	3.63	1.36	2.99
2040-2045	3.42	1.26	2.67

Fuente: MTOP (2019).

Tráfico promedio diario anual (TPDA_i)

El Tráfico promedio diario anual (TPDA_i) es la unidad de medida para el tráfico de una carretera y se mide en número de vehículos mixtos que circulan por esta.

El cálculo del TPDA se puede estimar mediante conteos manuales que son irremplazables y conteos automáticos que nos ayudan a conocer el volumen del tráfico de la carretera en análisis. Es importante que los conteos manuales se realicen en siete días seguidos

en una semana que no se encuentre afectada por situaciones exclusivas y los conteos automáticos correspondan a un mes.

Tasa de crecimiento anual (i)

Dentro del Ecuador, la información necesaria para obtener la tasa de crecimiento anual del tráfico, se obtienen a partir de las tasas de crecimiento obtenidas anteriormente, respecto al consumo de gasolina y diésel, así con respecto a la constitución del parque automotor (MOP, 2003).

Período de diseño (n)

El período de diseño se expresa en años, y es el tiempo que transcurre desde que un firme inicia su servicio hasta que adquiere su índice de servicio final. El índice de servicio final es el que percibe el pavimento cuando ya necesita ser rehabilitado. Además, la persona encargada del diseño puede ajustar este período de acuerdo a las condiciones específicas del proyecto.

Pavimentos flexibles:

Los períodos de diseño para pavimentos flexibles se encuentran entre 10 y 20 años (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

Pavimentos rígidos:

Los períodos de diseño para pavimentos rígidos se encuentran entre 20 y 40 años (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

2.2.1.3. Factor de carga equivalente (FCE_{TOTAL})

El tránsito está compuesto por vehículos que tienen diferentes pesos y números de ejes, los mismos que producen diferentes deformaciones y tensiones en el pavimento. Por lo tanto, es importante tener en cuenta esta diferencia a través de la conversión de tráfico mixto a un número de ejes equivalente de 8.2 toneladas que producirán el mismo daño, esto se realiza mediante factores equivalentes de carga (AASHTO, 1993 y 1998).

Ecuación 2.3. Factor de carga equivalente total

$$FCE_{TOTAL} = \sum FCE_{PARCIAL} * \%Vehiculos$$

Donde:

FCE_{PARCIAL}: factor de carga equivalente parcial

% Vehículos: porcentaje de vehículos de cada clase con respecto al total del tráfico futuro.

Factor de carga equivalente parcial (FCE_{PARCIAL})

De acuerdo a la AASHTO (1993 y 1998), el factor de carga equivalente es un valor numérico que enuncia la relación entre la pérdida de serviciabilidad producida por una carga dada de un tipo de eje y la causada por el eje estándar de 8.2 toneladas en el mismo eje.

Existen tablas de cálculo de factores de carga equivalente para los diferentes tipos de pavimento, de ejes y serviciabilidades finales (AASHTO, 1993 y 1998). A continuación, se presentan las tablas de factores de carga equivalente para los tipos de pavimentos:

Pavimentos flexibles.

Tabla 2.10. Relación de Cargas por Eje para determinar Ejes Equivalentes (EE) Para Afirmados, Pavimentos Flexibles y Semirrígidos

Tipo de eje	Eje Equivalente (EE _{8.2tn})
Eje Simple de ruedas simples (EE _{S1})	EE _{S1} = [P/6.6] ^{4.0}
Eje Simple de ruedas dobles (EE _{S2})	EE _{S2} = V[P/8.2] ^{4.0}
Eje Tandem (1 eje ruedas dobles + 1 eje rueda simple) (EE _{TA1})	EE _{TA1} = [P/14.8] ^{4.0}
Eje Tandem (2 ejes de ruedas dobles) (EE _{TA2})	EE _{TA2} = [P/15.1] ^{4.0}
Ejes Tridem (2 ejes ruedas dobles + 1 eje rueda simple) (EE _{TR1})	EE _{TR1} = [P/20.7] ^{3.9}
Ejes Tridem (3 ejes de ruedas dobles) (EE _{TR2})	EE _{TR2} = [P/21.8] ^{3.9}
P = peso real por eje en toneladas	

Nota. Datos obtenidos del Manual de Carreteras: Suelos, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos, en base a correlaciones con los valores de las Tablas del apéndice D de la Guía AASHTO 93. Fuente: MTC (2013).

Pavimentos rígidos.

Tabla 2.11. Relación de Cargas por Eje para determinar Ejes Equivalentes (EE) para Pavimentos Rígidos

Tipo de eje	Eje Equivalente (EE _{8.2tn})
Eje Simple de ruedas simples (EE _{S1})	EE _{S1} = [P/6.6] ^{4.1}
Eje Simple de ruedas dobles (EE _{S2})	EE _{S2} = V[P/8.2] ^{4.1}
Eje Tandem (1 eje ruedas dobles + 1 eje rueda simple) (EE _{TA1})	EE _{TA1} = [P/13.0] ^{4.1}

Eje Tandem (2 ejes de ruedas dobles) (EE _{TA2})	EE _{TA2} =[P/13.3] ^{4.1}
Ejes Tridem (2 ejes ruedas dobles + 1 eje rueda simple) (EE _{TR1})	EE _{TR1} =[P/16.6] ^{4.0}
Ejes Tridem (3 ejes de ruedas dobles) (EE _{TR2})	EE _{TR2} =[P/17.5] ^{4.0}
P = peso real por eje en toneladas	

Nota. Datos obtenidos del Manual de Carreteras: Suelos, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos, en base a correlaciones con los valores de las Tablas del apéndice D de la Guía AASHTO'93. *Fuente:* MTC (2013).

Porcentaje de vehículos de cada clase

Este porcentaje se realiza con respecto a la sumatoria total del tráfico futuro proyectado teniendo en cuenta a todos los tipos de vehículos a excepción del vehículo “liviano automóvil”.

Es decir:

Ecuación 2.4. Tráfico futuro proyectado según el período de diseño

$$\sum T f_n = \text{Livianos camionetas}_n + \text{buses}_n + \text{camiones}_n$$

$$\%V_{\text{camionetas}} = \frac{\text{Livianos camionetas}_n}{\sum T f_n}$$

$$\%V_{\text{buses}} = \frac{\text{buses}_n}{\sum T f_n}$$

$$\%V_{\text{camiones}} = \frac{\text{camiones}_n}{\sum T f_n}$$

Donde:

Tf_n: tráfico futuro proyectado según el período de diseño

% V_{camionetas}: porcentaje de camionetas

% V_{buses}: porcentaje de buses

% V_{camiones}: porcentaje de camiones

2.2.1.4. Factor de distribución del tráfico (Dt)

Este parámetro se encuentra en función del factor direccional que corresponde al número de vehículos pesados que circulan en un sentido de tráfico y del factor de carril que corresponde al carril de diseño que recibe el mayor número de ejes equivalentes (MTC, 2013). A continuación, se presenta una tabla a aplicar en función de los factores y de las condiciones específicas de la vía a diseñar:

Tabla 2.12. Factores de Distribución Direccional y de Carril para determinar el Tránsito en el Carril de Diseño

Número de calzadas	Número de sentidos	Número de carriles por sentido	Factor Direccional (Fd)	Factor Carril (Fc)	Factor Ponderado Fd x Fc para carril de diseño
1 calzada (para IMDa total de la calzada)	1 sentido	1	1.00	1.00	1.00
	1 sentido	2	1.00	0.80	0.80
	1 sentido	3	1.00	0.60	0.60
	1 sentido	4	1.00	0.50	0.50
	2 sentido	1	0.50	1.00	0.50
	2 sentido	2	0.50	0.80	0.40
2 calzadas con separador central (para IMDa total de las dos calzadas)	2 sentido	1	0.50	1.00	0.50
	2 sentido	2	0.50	0.80	0.40
	2 sentido	3	0.50	0.60	0.30
	2 sentido	4	0.50	0.50	0.25

Nota. Datos obtenidos del Manual de Carreteras: Suelos, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos, en base a correlaciones con los valores de las Tablas del apéndice D de la Guía AASHTO'93. *Fuente:* MTC (2013).

2.2.2. Californian Bearing Ratio (CBR)

2.2.2.1. Definición

Este ensayo fue uno de los principales en usarse para el diseño de pavimentos. Se basa en que los espesores del pavimento son inversamente proporcionales al valor de CBR de la subrasante, es decir, a menor valor de CBR de la subrasante mayores son los espesores del pavimento para soportar las solicitaciones del tráfico.

El CBR mide la resistencia del suelo a la penetración de un pistón de 3 pulg² de área de una probeta de 5 pulg de altura y 6 pulg de diámetro, a una velocidad de 0.05 pulg/min. La fuerza que se necesita para penetrar el pistón dentro de la subrasante se mide en determinados intervalos. Entonces, se realiza una comparación entre estas fuerzas y las necesarias para producir iguales penetraciones en una muestra estándar que es una piedra partida bien graduada (ASSHTO, 1993/1998).

La definición del CBR es la siguiente:

$$CBR = \frac{\text{carga que produce una penetración de 2.5mm en el suelo}}{\text{carga que produce una penetración de 2.5 mm en la muestra estándar}}$$

Este parámetro se mide en porcentaje, el cual, puede variar entre 2 a 3% para arcillas plásticas y a 70% o más para suelos granulares.

En la siguiente figura se puede apreciar curvas de penetración para diferentes clases de suelos:

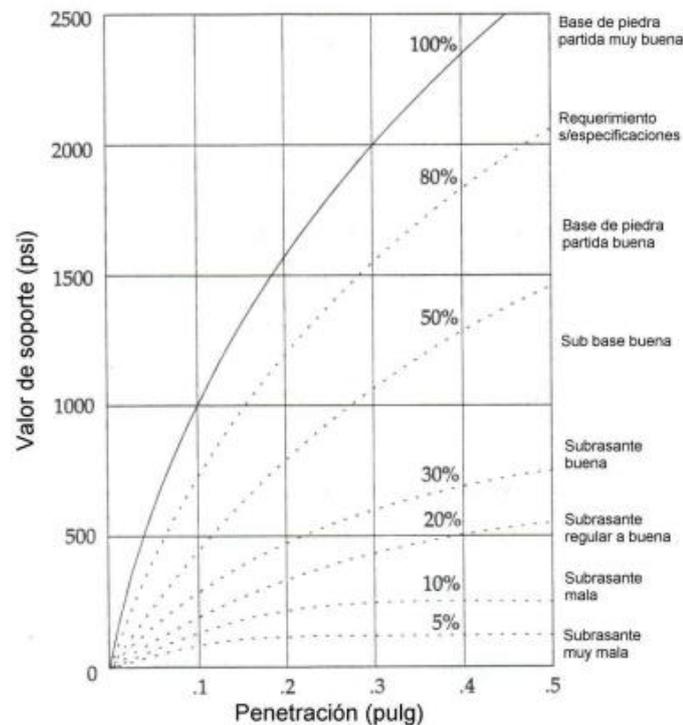


Figura 2.1. Curvas de penetración “CBR” para distintos suelos
Fuente: AASHTO (1993) y AASHTO (1998).

2.2.2.2. Relación del CBR con el Penetrómetro dinámico de cono (PDC)

Según Rondón Quintana y Reyes Lizcano (2015) el CBR es un “ensayo desarrollado por Stanton y Porter en 1929” (p. 367). Este ensayo es muy utilizado y sirve como variable de entrada para el diseño de las estructuras de pavimentos y puede determinarse en un laboratorio y también in situ.

Dentro de un laboratorio solo se puede obtener el CBR sobre muestras inalteradas; mientras que, realizarlo *in situ* sirve para todo tipo de suelos, sobre todo, suelos gruesos como gravas y arenas, pero es un ensayo que pocos laboratorios realizan directamente *in situ*. Sin embargo, lo que generalmente se realiza es relacionar el CBR con el índice de penetración (PDC) que se obtiene a partir de un ensayo de penetración en un cono dinámico (Rondón y Reyes, 2015).

A decir del autor, en Colombia (Invías) recomienda la siguiente ecuación para relacionar estos dos parámetros:

Ecuación 2.5. Californian bearing ratio

$$CBR = \frac{292}{PDC^{1.12}}$$

En esta ecuación el valor de PDC se encuentra entre 3 y 324 mm/golpe. Para PDC <3 mm/golpe, el CBR=100%, y para PDC>324mm/golpe, el CBR se considera menor a 0.5%. Esta ecuación puede ser utilizada para todo tipo de suelos excepto para aquellos tipos CL (arcilla de baja plasticidad) con CBR < 10% y CH (arcillas de alta plasticidad) (Rondón y Reyes, 2015, p. 350).

Para los suelos mencionados anteriormente se utilizan las siguientes ecuaciones:

Ecuación 2.6. Californian bearing ratio con CBR ≤ 10%

$$CBR = \frac{1}{(0.017019 PDC)^2}, \text{ para CL con CBR } \leq 10\%$$

Ecuación 2.7. Californian bearing ratio para CH

$$CBR = \frac{1}{0.002871 PDC}, \text{ para CH}$$

Donde:

CBR: californian bearing ratio

PDC: Penetrómetro dinámico de cono

2.2.2.3. Métodos para la determinación del CBR de diseño

El CBR de diseño es el parámetro de entrada para realizar el diseño de las estructuras de pavimentos, sin embargo, la subrasante presenta diferentes características en su tramo de estudio, por lo que, es necesario tomar varias muestras de suelo.

A continuación, se presentan tres métodos para calcular el CBR de diseño en función de los diferentes resultados de las muestras obtenidas:

- **Instituto del Asfalto**

Para obtener el CBR de diseño es necesario utilizar la siguiente tabla desarrollada por el Instituto del Asfalto, la que se encuentra en función del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas y del percentil que corresponde a cada uno de estos valores. Entonces, para realizar el cálculo se recomienda como mínimo efectuar cinco ensayos de CBR, los que se tienen que ordenar de menor a mayor para determinar el porcentaje de valores mayores o iguales de cada valor de CBR (Rondón y Reyes, 2015).

Se realiza un gráfico con los datos obtenidos en el que el eje “y” corresponde al porcentaje de valores mayores o iguales de cada valor de CBR y el eje “x” corresponde al CBR, se elige el valor del percentil de diseño en función del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas; finalmente, con base a este percentil se estima el valor del CBR de diseño (Rondón y Reyes, 2015).

Tabla 2.13. Percentiles para determinar el CBR de diseño

Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas	Percentil de diseño [%]
$\leq 10^4$	60
$10^4 - 10^6$	75
$\geq 10^6$	87.5

Nota. Datos obtenidos del libro de Pavimentos: Materiales, Construcción y Diseño en base al Instituto del Asfalto. Fuente: Rondón Quintana y Reyes Lizcano (2015).

- **Criterio de la Media**

El Criterio de la Media es un método que evalúa un valor, en el cual, la mitad de los datos quedan por debajo y la mitad quedan por arriba del valor calculado; posteriormente, al valor seleccionado se le disminuye un parámetro Z_R veces la desviación estándar, que está en función del nivel de confianza con que se realice el diseño (Higuera Sandoval, 2015). La tabla 2.15 presenta la desviación normal estándar en función de la confiabilidad.

Entonces, de acuerdo a Higuera Sandoval (2015) el CBR de diseño se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación 2.8. CBR de diseño

$$CBR \text{ de diseño} = \overline{CBR} - (Z_R * \sigma)$$

Donde:

CBR de diseño: CBR de diseño

\overline{CBR} : valor medio de los valores de CBR

Z_R : desviación normal estándar

σ : desviación estándar de los valores de CBR

Ecuación 2.9. Valor medio de los valores de CBR

$$\overline{CBR} = \frac{\sum_{i=1}^n CBR_i}{n}$$

Donde:

\overline{CBR} : valor medio de los valores de CBR

CBR_i : valor del CBR (%)

n: número de valores de CBR

Ecuación 2.10. Desviación estándar de los valores de CBR

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{CBR} - CBR_i)^2}{n - 1}}$$

Donde:

σ : desviación estándar de los valores de CBR

\overline{CBR} : valor medio de los valores de CBR

CBR_i : valor del CBR (%)

n: número de valores de CBR

- **Promedio Aritmético**

Los datos de CBR obtenidos se los suma y se los divide para el total de datos, obteniéndose un número medio que es el CBR de diseño.

2.3. Diseño de pavimentos flexibles

Para el diseño de la estructura o espesor de un pavimento es importante determinar algunos parámetros de diseño, necesarios para el correcto dimensionamiento de cada capa estructural; dichos parámetros se presentan más a detalle a continuación:

2.3.1. Fórmula AASHTO 93

Ecuación 1.1. Ecuación de la AAHTO 93 para pavimentos flexibles

$$\log_{10}W_{18} = Z_R S_0 + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \left[\frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}} \right]} + 2.32 \log_{10} M_r - 8.07$$

Donde:

W_{18} : número admisible de ejes equivalentes de 8.2 toneladas

Z_R : desviación normal estándar

S_0 : desviación normal integral

SN : número estructural del pavimento. ($SN = a_1 d_1 + a_2 d_2 m_2 + a_3 d_3 m_3$)

a_i : coeficiente estructural de la capa i

d_i : espesor de la capa i (cm)

m_i : coeficiente de drenaje de la capa i

ΔPSI : diferencia entre los índices de servicio inicial y terminal

M_r : módulo de resiliencia (psi)

2.3.2. Serviciabilidad (ΔPSI)

Es la capacidad de servir al tipo de tránsito para el cual ha sido diseñado la estructura de pavimento. De esta forma se obtiene el índice de serviciabilidad presente (ΔPSI) que es la diferencia algebraica de los índices de serviciabilidad que ofrece la carretera al inicio y al final de su vida útil. La serviciabilidad presente califica al pavimento entre 0 (malas condiciones) y 5 (excelente estado) (AASHTO, 1993 y 1998).

Ecuación 2.11. Índice de servicio presente

$$\Delta PSI = P_i - P_t$$

Donde:

ΔPSI : índice de servicio presente

P_i : índice de servicio inicial

P_t : índice de servicio final

El índice de servicio inicial (P_i) se encuentran en función del diseño del pavimento y la de la calidad de construcción y el índice de servicio final (P_t) considera la categoría de la carretera y el criterio técnico del ingeniero a cargo del proyecto.

La AASHTO (1993 y 1998) recomienda los siguientes valores:

- Serviciabilidad inicial: $\rightarrow P_i = 4.2$
- Serviciabilidad final: $\rightarrow P_t = 2.5$ para carreteras de primer orden
 $\rightarrow P_t = 2$ para carreteras menos importantes

Además, Cano Becerril (2006) recomienda los siguientes índices de serviciabilidad final (P_t) considerando que estos índices corresponden al nivel de servicio en el cual la estructura necesita algún tipo de rehabilitación para iniciar un nuevo período de vida útil:

- P_t : **3.00** para autopistas
- P_t : **2.5** para carreteras principales, arterias urbanas
- P_t : **2.25** para carreteras secundarias importantes, calles comerciales e industriales
- P_t : **2.00** Carreteras secundarias, calles residenciales y estacionamientos.

2.3.3. Desviación normal estándar (Z_r)

La confiabilidad que se le otorga a un pavimento es la probabilidad de que agentes externos como el clima o el tránsito, pueden ocasionar inconvenientes a la resistencia, durabilidad y la capacidad de resistir tensiones de la subrasante, el pavimento y los materiales. Otra consecuencia es la expansión de la subrasante, provocando la disminución de la calidad de la capa de rodadura y su serviciabilidad (Montejo Fonseca, 2006).

Descrito de otra manera, la confiabilidad está afín con el desempeño del pavimento frente a las solicitaciones de carga e intemperismo, es decir, que la probabilidad de que los problemas de fallas y deformaciones sean menores que los niveles permisibles. Para adoptar el

valor de este parámetro se toma en cuenta la importancia de la vía y el tránsito calculado para el diseño.

Para elegir el nivel de confianza se tiene en cuenta el costo de construcción y el costo de rehabilitación del pavimento, es decir, un nivel de confiabilidad alto implica un espesor mayor de la estructura, mayores costos iniciales, por lo mismo se prevé un bajo costo de mantenimiento. Sin embargo, un nivel de confianza bajo da como resultado espesores menores, bajos costos de construcción, pero con un mayor costo de rehabilitación. Por lo que se ha propuesto los siguientes valores de confiabilidad en donde la suma de los costos iniciales y de mantenimiento son los mínimos (AASHTO, 1993 y 1998).

Tabla 2.14. Niveles de confiabilidad aconsejados por AASHTO

Tipo de camino	Confiabilidad recomendada	
	Zona urbana	Zona rural
Rutas interestatales y autopistas	85-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-99
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Fuente: AASHTO (1993) y AASHTO (1998).

La confiabilidad no es un dato que se utiliza directamente en la ecuación de la AASHTO'93, por lo que, se debe recurrir a la estadística y utilizar el coeficiente conocido como desviación normal estándar (Z_R). A continuación, se presentan los valores de este coeficiente en función de la confiabilidad:

Tabla 2.15. Porcentaje de confiabilidad con su respectiva desviación normal estándar

Confiabilidad R (%)	Desviación normal estándar Z_R
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555

95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99,9	-3.090
99,99	-3.750

Fuente: Coronado Iturbide (2002).

2.3.4. Desviación normal integral (S_0)

La representación real del comportamiento de un pavimento y la curva de diseño dada por la AASHTO, poseen una forma idéntica pero no es la misma. La falta de coincidencia se debe a la variación de la información manejada en el dimensionamiento del pavimento y a los errores dentro de la ecuación; estos provocan la dispersión de los datos que configuran la curva real del comportamiento del pavimento. Para ajustar ambos comportamientos se utiliza la desviación normal integral (S_0). A su vez, este parámetro es considerado para corregir la confiabilidad y mantener el diseño del lado de la seguridad, es por esto que dentro de la ecuación va acompañado de la desviación normal estándar (Z_r) (Universidad Mayor de San Simón, 2004).

De acuerdo a Rondón Quintana y Reyes Lizcano (2015) el rango sugerido para la desviación normal integral (S_0) se encuentra dentro de los siguientes valores:

- Construcción nueva: $\rightarrow S_0: 0.45$
- Sobrecapas: $\rightarrow S_0: 0.5$

2.3.5. Módulo de resiliencia (M_r)

Este factor ayuda a caracterizar las propiedades de la subrasante. Se supone que el comportamiento del suelo subrasante es un medio elástico lineal, por lo que, el módulo resiliente demuestra que tan rígido es un material bajo carga cíclica del tipo resiliente.

En campo es complicado la determinación de esta variable, debido a la falta de quipos y a la definición acertada de trayectorias de esfuerzo, por lo que se ha decidido establecerla en

función del valor del CBR a través de múltiples ecuaciones disponibles en la bibliografía internacional (Rondón Quintana y Reyes Lizcano, 2015).

A continuación, el *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (como se citó en MTC, 2013) plantea la siguiente ecuación para el cálculo del módulo resiliente:

Ecuación 2.12. Módulo de resiliencia para todos los valores de CBR

$$M_r = 2555 * CBR^{0.64}$$

Donde:

M_r : módulo de resiliencia (psi)

CBR: california Bearing Ratio

Además, Heukelom y Klomp (citado en Montejo Fonseca, 2006) han establecido la siguiente ecuación para el cálculo de este parámetro:

Ecuación 2.13. Módulo de resiliencia para CBR < 10%

$$M_r = 1500 * CBR \quad CBR < 10\%$$

Montejo Fonseca (2006) también propone las siguientes ecuaciones para establecer el módulo resiliente:

- Para suelos finos:

Ecuación 2.14. Módulo de resiliencia para suelos finos con CBR < 7.2%

$$M_r = 1500 * CBR; \text{ para } CBR < 7.2\%$$

Ecuación 2.15. Módulo de resiliencia para suelos finos 7.2% < CBR < 20%

$$M_r = 3000 * CBR^{0.65}; \text{ para } 7.2\% < CBR < 20\%$$

- Para suelos granulares:

Ecuación 2.16. Módulo de resiliencia para suelos granulares

$$M_r = 4326 * \ln CBR + 241$$

Donde:

M_r : módulo de resiliencia (psi)

CBR: California Bearing Ratio

2.3.6. Número estructural (SN)

El número estructural se lo considera como un número abstracto que representa “la resistencia estructural de pavimento requerida para una combinación especificada del valor de soporte del suelo, total de cargas equivalentes sobre un eje sencillo de 18000 lb, índice terminal de capacidad de servicio, coeficientes de capa y coeficientes de drenaje (Cano Becerril, 2006, p. 136).

El MTC (2013) deduce que el número estructural (SN) se obtiene a través de la aplicación de los datos adquiridos y procesados en la ecuación de diseño que propone la AASHTO’93, el cual, representa el espesor total de la estructura de pavimento. Este espesor se debe convertir a espesores reales para cada capa que conforma el paquete estructural, es decir, la capa de rodadura, la base granular y la subbase granular mediante la aplicación de los coeficientes estructurales, como se plantea en la siguiente ecuación:

Ecuación 2.17. Número estructural

$$SN = a_1d_1 + a_2d_2m_2 + a_3d_3m_3$$

Donde:

SN: número estructural

a_i : coeficiente estructural de la capa i

d_i : espesor de la capa i (cm)

m_i : coeficiente de drenaje de la capa i

Cabe recalcar que el resultado de la ecuación anterior puede ser variable; en otros términos, hay muchas combinaciones de espesores para cada capa que dan una solución correcta. Se debe tener en cuenta que el valor de SN debe ser mayor o igual al valor de SN calculado mediante la fórmula AASHTO’93. Para la elección de los coeficientes estructurales, drenaje y espesores, el diseñador debe realizar un análisis profundo acerca del comportamiento de las diferentes alternativas de estructuras de pavimentos seleccionadas (MTC, 2013).

2.3.6.1. Coeficiente estructural de capa (a_i)

Estos coeficientes simbolizan la resistencia relativa del material que va a ser usado en la construcción de cada capa (superficie de rodadura, base y subbase).

El MTC (2013) propone una tabla para establecer los coeficientes estructurales para las diferentes capas del pavimento, basándose en la Guía de diseño AASHTO'93 a través de las siguientes figuras:

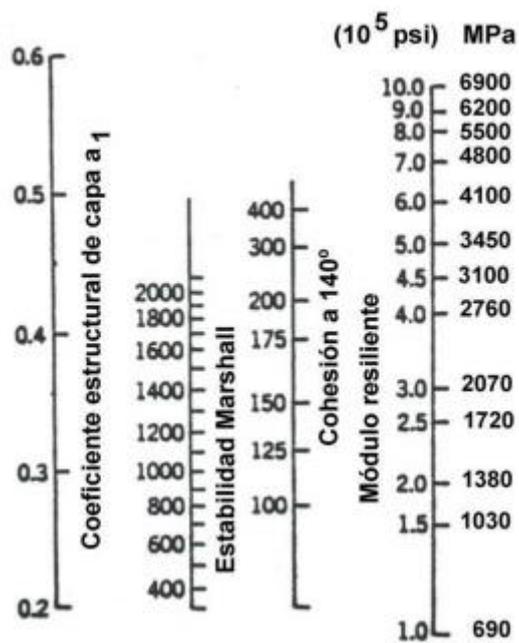


Figura 2.2. Coeficientes estructurales para capas asfálticas
Fuente: AASHTO (1993) y AASHTO (1998).

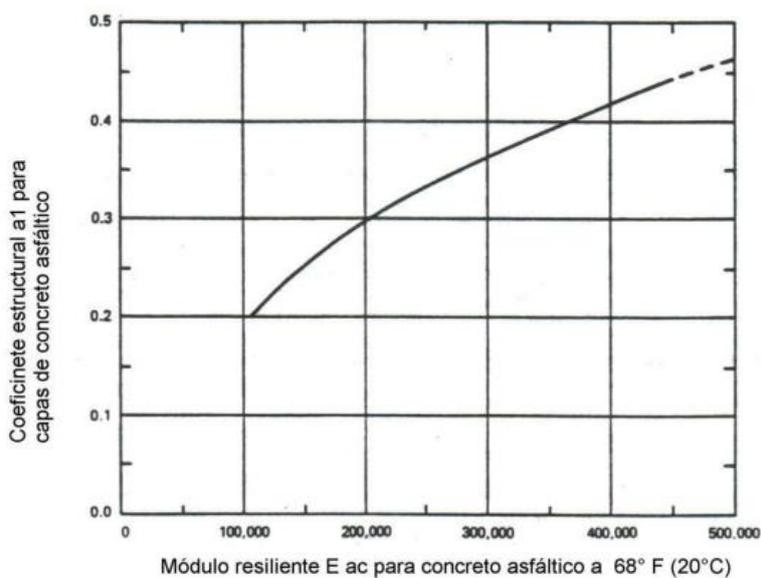


Figura 2.3. Gráfico para determinar el coeficiente estructural de capas asfálticas en función del módulo resiliente
Fuente: AASHTO (1993) y AASHTO (1998).

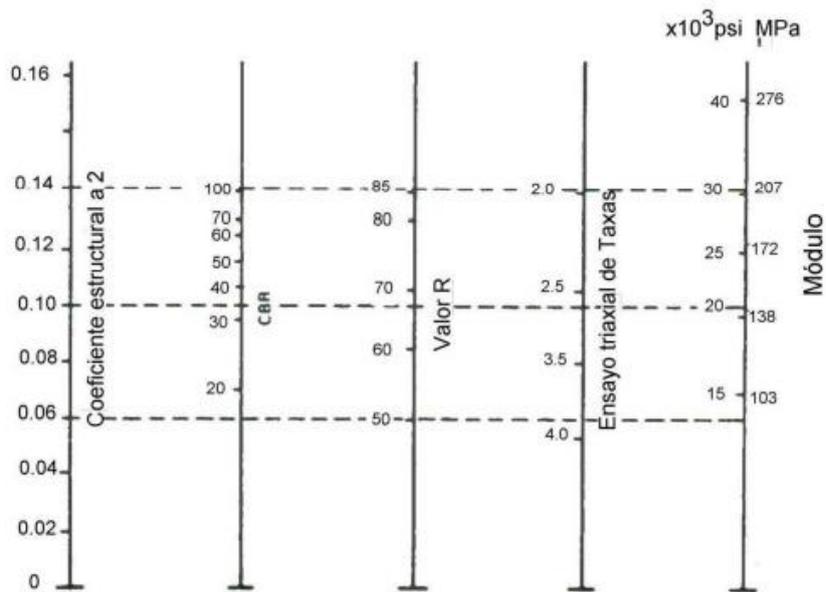


Figura 2.4. Relación entre el coeficiente estructural para base granular y distintos parámetros resistentes
Fuente: AASHTO (1993) y AASHTO (1998).

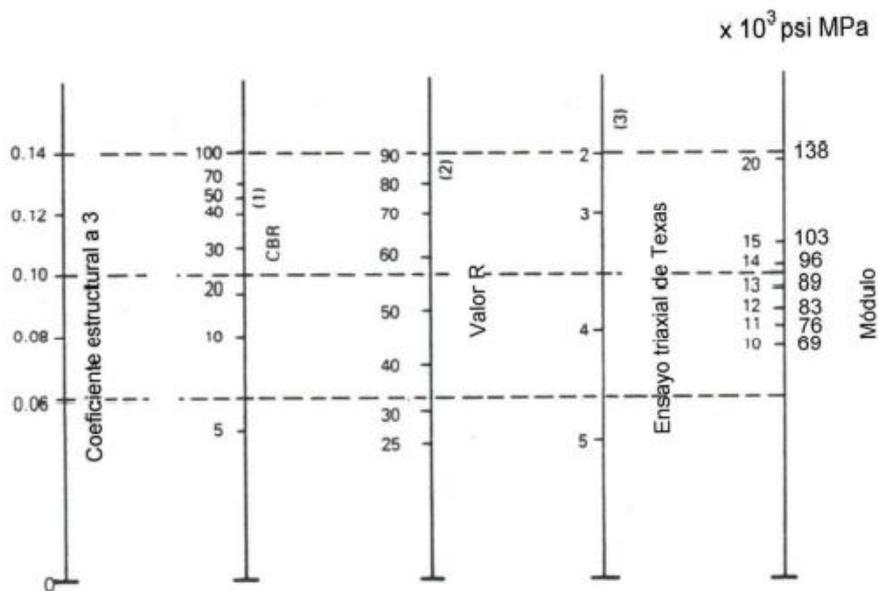


Figura 2.5. Relación entre el coeficiente estructural para subbase granular y distintos parámetros resistentes
Fuente: AASHTO (1993) y AASHTO (1998).

La tabla que se muestra a continuación es un resumen de los ábacos de las figuras 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5, luego de realizar varios ensayos con cada una de las capas que conforman la estructura de un pavimento.

Tabla 2.16. Coeficientes Estructurales de las Capas del Pavimento a_i

COMPONENTE DEL PAVIMENTO	COEFICIENTE	VALOR COEFICIENTE ESTRUCTURAL a_i (cm)	OBSERVACIÓN
CAPA SUPERFICIAL			
Carpeta Asfáltica en Caliente, módulo 2,965 MPa (430,000 PSI) a 20 oC (68 Of)	a_1	0.170 / cm	Capa Superficial recomendada para todos los tipos de Tráfico
Carpeta Asfáltica en Frío, mezcla asfáltica con emulsión.	a_1	0.125 / cm	Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 1'000,000$ EE
Micropavimento 25mm	a_1	0.130 / cm	Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 1'000,000$ EE
Tratamiento Superficial Bicapa	a_1	0.250 (*)	Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 500,000$ EE. No aplica en tramos con pendiente mayor a 8%; y, en vías con curvas pronunciadas, curvas de volteo, curvas y contracurvas, y en tramos que obliguen al frenado de vehículos
Lechada asfáltica (<i>slurry seal</i>) de 12mm	a_1	0.150 (*)	Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 500,000$ EE No aplica en tramos con pendiente mayor a 8% y en tramos que obliguen al frenado de vehículos
(*) Valor Global (no se considera el espesor)			
BASE			
Base Granular CBR 80% compactada al 100% de la MDS	a_2	0.052 / cm	Capa de Base recomendada para Tráfico $\leq 5'000,000$ EE
Base Granular CBR 100% compactada al 100% de la MDS	a_2	0.054 / cm	Capa de Base recomendada para Tráfico $> 5'000,000$ EE
Base Granular tratada con Asfalto (Estabilidad Marshall = 1500lb)	a_{2a}	0.115 / cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
Base Granular tratada con Cemento (resistencia a la	a_{2b}	0.070 / cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico

compresión 7 días = 35 kg/cm ²)			
Base Granular tratada con Cal (resistencia a la compresión 7 días = 12 kg/cm ²)	a _{2c}	0.080 / cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
SUBBASE			
Subbase Granular CBR 40% compactada al 100% de la MDS	a ₃	0.047 / cm	Capa de Subbase recomendada para Tráfico ≤ 15'000,000 EE
Subbase Granular CBR 60% compactada al 100% de la MDS	a ₃	0.050 / cm	Capa de Subbase recomendada para Tráfico > 15'000,000 EE

Nota. Datos obtenidos del Manual de Carreteras: Suelos, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos, en base a datos de la Guía AASHTO '93. *Fuente:* MTC (2013).

2.3.6.2. Drenaje (m_i)

El método AASHTO ajusta los coeficientes de cada capa estructural con factores mayores o menores que la unidad para apreciar el drenaje y el período en el que las capas que conforman la estructura están sometidas a niveles de humedad próximos a saturación.

El valor del coeficiente de drenaje está dado por dos variables que son:

- La calidad del drenaje
- Exposición a la saturación, que es el porcentaje de tiempo en el que un pavimento está expuesto a ciertas escalas de humedad que se acercan a la saturación durante un año

La siguiente tabla muestra tiempos de drenaje recomendados por la AASHTO:

Tabla 2.17. Capacidad del drenaje

Calidad de drenaje	50% de saturación en:	85% de saturación en:
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	Más de 10 horas
Muy pobre	El agua no drena	Mucho más de 10 horas

Nota. Estas recomendaciones están basadas en el tiempo requerido para drenar la capa de base hasta un grado de saturación del 50%, pero el criterio del 85% de saturación reduce en forma significativa el tiempo real usado para seleccionar la calidad del drenaje. *Fuente:* AASHTO (1993) y AASHTO (1998).

Además, la *tabla 2.18* nos muestra valores de los coeficientes de drenaje (m_i), para porcentajes del tiempo en que el pavimento estará expuesto en un año a escalas de humedad cercanos a saturación y capacidad de drenaje.

Tabla 2.18. Valores recomendados del coeficiente de drenaje (m_i), para capas granulares no tratadas en pavimentos flexibles

Calidad del drenaje	Porcentajes del tiempo en que el pavimento estará expuesto en un año a escalas de humedad cercanos a saturación			
	Menor 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

Fuente: AASHTO (1993) y AASHTO (1998).

2.3.6.3. Espesores mínimos (d_i)

No es recomendable colocar capas de un grosor menores al mínimo requerido. Asimismo, las capas con mayores espesores por encima del mínimo son más estables. Por lo general, se establecen los espesores mínimos para tratamientos superficiales; el grosor de la superficie de rodadura es despreciable en lo que representa al porcentaje de SN absorbido, sin embargo, tiene un mayor efecto en las capas granulares inferiores, ya que disminuye la entrada de agua en la estructura del pavimento (AASHTO, 1933 y 1998).

En la *tabla 2.19* se puede observar los espesores mínimos requeridos para las capas de rodadura asfáltica y base granular en función del tránsito (ESALs):

Tabla 2.19. Espesores mínimos de concreto asfáltico y base granular

Número de ESALs	Concreto Asfáltico	Base Granular
Menos de 50.000	2.5 cm	10 cm
50.000 - 150.000	5.0 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	9.0 cm	15 cm
Más de 7.000.000	10.0 cm	15 cm

Fuente: AASHTO (1993) y AASHTO (1998).

2.4. Diseño pavimentos rígidos

El diseño se lo realiza a través de la aplicación de la siguiente ecuación general desarrollada por la AASHTO 93, que se encuentra en función de diferentes factores relevantes para el adecuado cálculo del espesor de pavimento rígido. A continuación, se describen estos parámetros:

2.4.1. Fórmula AASHTO 93

Ecuación 1.2. Ecuación de la AASHTO 93 para pavimentos rígidos

$$\log_{10}W_{8.2} = Z_R S_0 + 7.35 \log_{10}(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \left[\frac{1.25 * 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}} \right]}$$
$$+ (4.22 - 0.32P_t) \log_{10} \left[\frac{M_r C_{dx} (0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51 * J \left(0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{\left(\frac{E_c}{k} \right)^{0.25}} \right)} \right]$$

Donde:

$W_{8.2}$: número previsto de ejes equivalentes de 8.2 toneladas

Z_R : desviación normal estándar

S_0 : desviación normal integral

D : espesor del pavimento de concreto (mm)

ΔPSI : diferencia entre los índices de servicio inicial y final

P_t : índice de servicio final

M_r : resistencia media del concreto (Mpa)

C_{dx} : coeficiente de drenaje

J : coeficiente de transmisión de cargas en las juntas

E_c : módulo de elasticidad del concreto (Mpa)

k : módulo de reacción de la superficie (Mpa/m)

2.4.2. Serviciabilidad ΔPSI

Es una medida que cuantifica la capacidad del pavimento para ofrecer una superficie confortable y segura para los usuarios; este factor va desde 0 que significa que un pavimento

intransitable hasta 5 que es un pavimento en óptimas condiciones. Además, es importante mencionar que estos factores dependen del adecuado acabado de construcción (AASHTO, 1993 y 1998).

Ecuación 2.11. Índice de servicio presente

$$\Delta PSI = P_i - P_t$$

Donde:

ΔPSI : índice de servicio presente

P_i : serviciabilidad inicial

P_t : serviciabilidad final

Serviciabilidad inicial

Este factor hace referencia a una vía que recién se construyó, de acuerdo a la AASHTO (1993 y 1998) para pavimentos rígidos $P_i = 4.5$

Serviciabilidad final

Este factor hace referencia a una vía que alcanzó el final de su vida útil, de acuerdo a la AASHTO (1993 y 1998) para vías muy importantes $P_t = 2.5$ o más y para vías de menor jerarquía $P_t = 2.0$

2.4.3. Desviación normal estándar (Z_r)

Este factor se encuentra en función del parámetro de confiabilidad (R), el que considera las variaciones del tránsito y su comportamiento, suministrando un determinado nivel de confianza para que el pavimento funcione de manera adecuada en su período de diseño. Los valores de Z_r se encuentran en la *tabla 2.15* de acuerdo al nivel de confiabilidad.

2.4.4. Desviación normal integral (S_0)

Este parámetro de diseño considera la variabilidad esperada de la predicción del tránsito, medio ambiente, construcción e incertidumbre del modelo (MTC, 2013). Es factor un de corrección que genera seguridad evaluando los datos dispersos.

- Construcción nueva $\rightarrow S_0 = 0.35$
- Sobrecapas $\rightarrow S_0 = 0.40$

2.4.5. Módulo de reacción de la superficie (k)

Este factor caracteriza el tipo de subrasante y es el valor de la capacidad de soporte del suelo. De acuerdo a la AASHTO (1993 y 1998) se obtiene este módulo a través de un ábaco que está en función del módulo elástico de la subbase, módulo resiliente de la subrasante y del espesor de subbase que es un valor asumido. A continuación, se presenta un nomograma para la estimación del módulo de reacción:

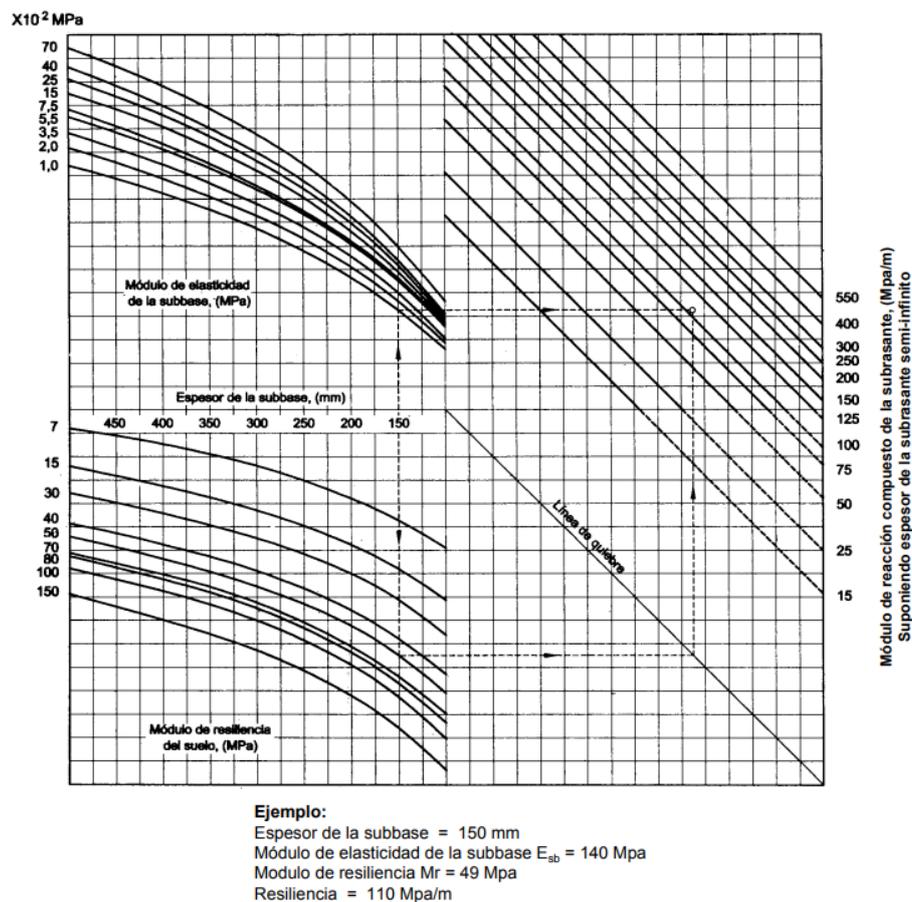


Figura 2.6. Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante, suponiendo una profundidad infinita.

Nota. Figura obtenida del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, adquirida de la Guía para diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO 93. Fuente: Coronado Iturbide (2002).

Es importante considerar el soporte que va a tener la losa de concreto. Según Rondón y Reyes (2015), si la losa se apoya directamente sobre la subrasante, se utiliza un ensayo de prueba de placa que cuantifica indirectamente la rigidez de la subrasante bajo una carga monotónica, aplicando una fuerza por medio de una placa rígida de 30cm de diámetro; y, posteriormente, se mide el desplazamiento de la placa sobre el suelo hasta obtener una gráfica de presión vs penetración. Entonces, k es el resultado de aplicar una carga unitaria necesaria

para generar una penetración de la placa en el terreno de 5 mm, por lo que se define como la relación esfuerzo desplazamiento. Este ensayo es costoso, por esta razón, en la práctica se realiza una correlación con el CBR mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación 2.18. Módulo de reacción de la superficie para $CBR \leq 10\%$

$$k = 2.55 + 52.5 \log(CBR) \quad \text{para } CBR \leq 10\%$$

Ecuación 2.19. Módulo de reacción de la superficie para $CBR \geq 10\%$

$$k = 46 + 9.08[\log(CBR)]^{4.34} \quad \text{para } CBR \geq 10\%$$

Donde:

k: módulo de reacción de la superficie

CBR: California Bearing Ratio

También se puede estimar el módulo de reacción mediante la siguiente gráfica generada a través de la correlación con el CBR, debido a que no es necesario tener un valor exacto de k, porque las variaciones mayores de k no afectan los espesores de diseño (Iturbide, 2002).

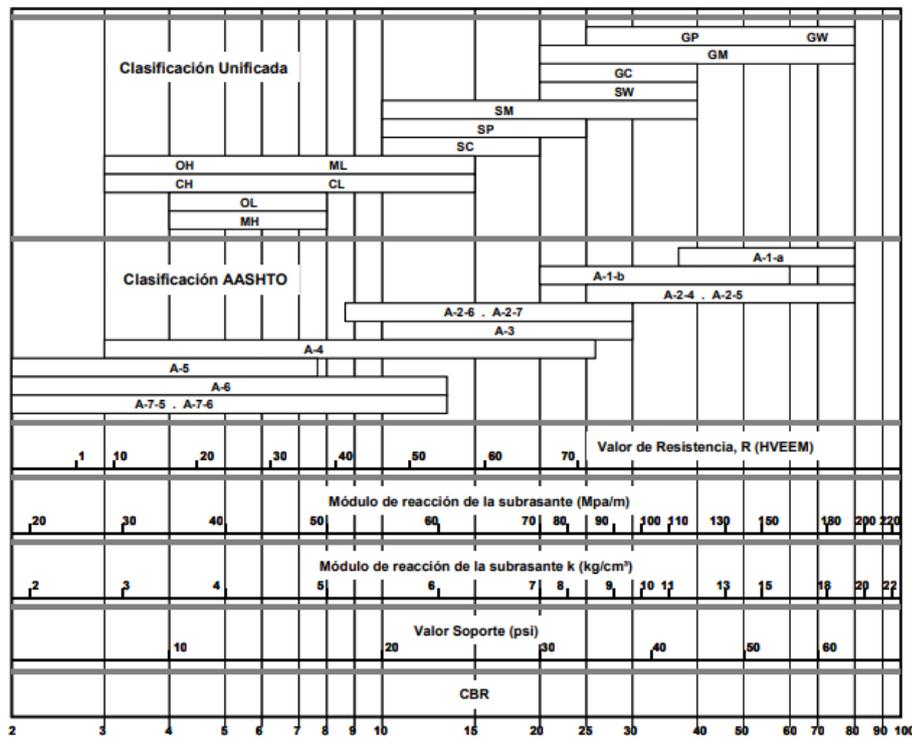


Figura 2.7. Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos
 Nota. Figura obtenida del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos en base a la Guía para diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO 93. Fuente: Coronado Iturbide (2002).

Por otro lado, cuando la losa se apoya sobre una capa granular como: base, subbase o material estabilizado genera un coeficiente de reacción (k) mayor, la colocación de estas capas intermedias mejora las condiciones de apoyo y se lo realiza a través del cálculo del coeficiente de reacción combinado (MTC, 2013). Se aplica la siguiente ecuación:

Ecuación 2.20. Coeficiente de reacción combinado

$$k_c = \left[1 + \left(\frac{h}{38} \right)^2 * \left(\frac{k_1}{k_0} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{0.5} * k_0$$

Donde:

k_c : coeficiente de reacción combinado (kg/cm³)

k_1 : coeficiente de reacción de la subbase granular (kg/cm³)

k_0 : coeficiente de reacción de la subrasante (kg/cm³)

h : espesor de la subbase granular (cm)

Es adecuado mencionar que, para el cálculo de esta fórmula, los coeficientes k_1 y k_0 se los puede determinar mediante la aplicación de las *ecuaciones 2.18 y 2.19* y también, a partir de la *figura 2.5*.

2.4.6. Coeficiente de drenaje (C_{dx})

Como ya se mencionó anteriormente, la humedad tiene gran influencia en las propiedades de los materiales que conforman las diferentes capas estructurales del pavimento, es por eso que, se debe elegir un coeficiente de drenaje adecuado en función de la zona en donde se vaya a desarrollar el proyecto. Los coeficientes de drenaje se encuentran en la *tabla 2.18*.

2.4.7. Resistencia media del concreto (M_r)

Los pavimentos de hormigón trabajan especialmente a flexión, es por eso que, se introduce este factor en la ecuación general desarrollada por la AASHTO 93 (MTC, 2013). A continuación, se presenta una ecuación obtenida del Manual de Carreteras: Suelos, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos de Perú para el cálculo de la resistencia media del concreto que se encuentra correlacionada con el módulo de compresión simple del concreto:

Ecuación 2.21. Resistencia media del concreto

$$M_r = a\sqrt{f'c}$$

Donde:

M_r : resistencia media del concreto (kg/cm²)

$f'c$: resistencia a la compresión simple del concreto (kg/cm²)

a = varía entre 1.99 y 3.18 (Recomendado 2.2)

Además, se puede obtener este parámetro mediante los rangos de tráfico pesado expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas, a través de la siguiente tabla:

Tabla 2.20. Valores Recomendados de Resistencia del Concreto según rango de Tráfico

RANGOS DE TRÁFICO PESADO EXPRESADO EN EE	RESISTENCIA MÍNIMA A LA FLEXOTRACCIÓN DEL CONCRETO (M_R)	RESISTENCIA MÍNIMA EQUIVALENTE A LA COMPRESION DEL CONCRETO ($F'c$)
$\leq 5'000,000$ EE	40 kg/cm ²	280 kg/cm ²
$> 5'000,000$ EE $\leq 15'000,000$ EE	42 kg/cm ²	300 kg/cm ²
$> 15'000,000$ EE	45 kg/cm ²	350 kg/cm ²

Nota. Datos obtenidos del Manual de Carreteras: Suelos, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos. Fuente: MTC (2013).

2.4.8. Módulo de elasticidad del concreto (E_c)

Se realiza el cálculo mediante la resistencia a compresión o flexotracción del concreto y se lo calcula mediante la siguiente ecuación propuesta por la AASHTO 93:

Ecuación 2.22. Módulo de elasticidad del concreto

$$E_c = 57000(f'c)^{0.5}$$

Donde:

E_c : módulo de elasticidad del concreto (psi)

$f'c$: resistencia a la compresión simple del concreto (psi)

2.4.9. Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas (J)

Es la capacidad que tiene la losa de concreto de transmitir o distribuir las cargas a la losa vecina entre juntas y fisuras, minimizando las deflexiones que se puedan originar. Esta transferencia de cargas se produce a través de: la trabazón entre los agregados o dispositivos

llamados pasadores (AASHTO, 1993 y 1998). A continuación, se presenta una figura de la representación de la transferencia de carga:

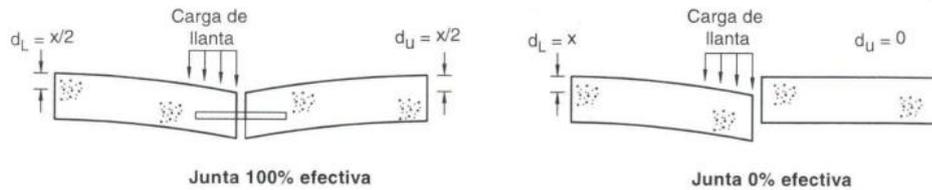


Figura 2.8. Ilustración del concepto de transferencia de cargas

Nota. La figura muestra una transferencia de cargas del 100% que se genera mediante un dispositivo de transmisión de carga, en donde, la losa no cargada tiene una deflexión igual a la losa cargada y una transferencia de cargas del 0% que se genera cuando la losa no cargada no experimenta una deflexión. Fuente: AASHTO (1993 y 1998).

Los valores de este factor están en función del tipo de pavimento de concreto a construir, de la existencia o no de una berma lateral y su tipo, y la presencia o no de dispositivos de transferencia de cargas. Además, este parámetro es directamente proporcional al valor final del espesor de la losa, por lo tanto, a mayor valor de J , mayor espesor de concreto (MTC, 2013). En la siguiente tabla se presentan los valores de coeficiente de transmisión de carga J :

Tabla 2.21. Valores de coeficiente de Transmisión de Carga J

TIPO DE BERMA	J			
	GRANULAR O ASFÁLTICA		CONCRETO HIDRÁULICO	
VALORES J	SI (con pasadores)	NO (con pasadores)	SI (con pasadores)	NO (con pasadores)
	3.2	3.8 – 4.4	2.8	3.8

Nota. Datos obtenidos del Manual de Carreteras: Suelos, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos, en base a los valores de la tabla de coeficientes de transferencia de cargas desarrollada por la AASHTO 93. Fuente: MTC (2013).

CAPÍTULO 3

Desarrollo del catálogo de secciones estructurales para pavimentos

3.1. Rangos de tráfico (ESALs)

La clasificación que se muestra en la *tabla 2.1* es incorrecta, debido a que no se considera la distribución del tráfico, es decir, el daño que causan 500 vehículos livianos no es el mismo que causan 500 vehículos pesados. Por lo que, el tráfico mixto TPDA es necesario convertirlo y clasificarlo mediante sus *Ejes Equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$)* teniendo en cuenta el período de diseño y su tasa de crecimiento (Cano Becerril, 2006).

El método AASHTO 93 reconoce la dificultad de realizar las proyecciones precisas, sobre todo en países en vías de desarrollo como Ecuador, por lo que, se ha tomado como referencia el manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, que obtuvo los datos de tráfico mediante un estudio de una muestra representativa aleatoria de pesos por eje de vehículos pesados. Para este estudio se utilizaron equipos portátiles que alcance un número superior al 30% de los vehículos pesados del día (MTC, 2013).

El MTC (2013) establece la siguiente tabla para la clasificación del tráfico en TPDA:

Tabla 3.1. Clasificación de Carreteras en función de la demanda en Perú

Clasificación de las carreteras en el Perú	
Clase de Carretera	Índice Medio Diario Anual (IMDA)
Autopistas de primera clase	Más de 6.000
Autopistas de segunda clase	De 4.000 a 6.000
Carreteras de primera clase	De 2.000 a 4.000
Carreteras de segunda clase	De 400 a 2000
Carreteras de tercera clase	De 200 a 400
Trochas carrozables	Menos de 200

Fuente: Elaboración propia tomado del MTC (2014).

Entonces, se realizó los rangos de tráfico en ejes equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$) para el desarrollo del catálogo. La base fue un análisis comparativo entre las diferentes variables de Perú y Ecuador, como el factor de distribución de tráfico (Dt), las tasas de

crecimiento y proyección (Tf_n) y la clasificación de las carreteras por tráfico promedio diario anual (TPDA).

Se puede comprobar este análisis mediante la *tabla 3.1* establecida por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú y la *tabla 2.1* establecidas por el Ministerio de Obras Públicas del Ecuador; por lo tanto, se concluyó que las variables de tránsito del Ecuador son similares a las variables de tránsito de Perú. Además, se realizó una revisión de estudios publicados en el Sistema Nacional de Contratación Pública del Ecuador para analizar y comprobar los rangos de tráfico para el desarrollo del catálogo.

A continuación, se presenta las tablas que expresan los rangos de tráfico en ejes equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$) con su respectivo período de diseño, para el catálogo de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos enfocado en las carreteras de la red vial de la provincia del Azuay:

Tabla 3.2. Rangos de tráfico en Ejes Equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$), en el Carril de Diseño Para Pavimentos Flexibles, con período de diseño a 10 años

Tipos Tráfico Pesado expresado en EE	Rangos de Tráfico Pesado expresado en EE
T ₁	≤ 120,000
T ₂	> 120,000 ≤ 300,000
T ₃	> 300,000 ≤ 600,000
T ₄	> 600,000 ≤ 1'200,000
T ₅	> 1'200,000 ≤ 3'000,000
T ₆	> 3'000,000 ≤ 5'000,000
T ₇	> 5'000,000 ≤ 8'000,000
T ₈	> 8'000,000 ≤ 10'000,000
T ₉	> 10'000,000

Fuente: Elaboración propia, adaptada del MTC (2013).

Tabla 3.3. Rangos de tráfico en Ejes Equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$), en el Carril de Diseño Para Pavimentos Rígidos, con período de diseño a 20 años

Tipos Tráfico Pesado expresado en EE	Rangos de Tráfico Pesado expresado en EE
T ₁	≤ 300,000
T ₂	> 300,000 ≤ 750,000
T ₃	> 750,000 ≤ 1' 500,000
T ₄	> 1' 500,000 ≤ 3' 000,000
T ₅	> 3' 000,000 ≤ 7' 500,000
T ₆	> 7' 500,000 ≤ 12' 500,000
T ₇	> 12' 500,000 ≤ 20' 000,000
T ₈	> 20' 000,000 ≤ 25' 000,000
T ₉	> 25' 000,000

Fuente: Elaboración propia, adaptada del MTC (2013).

3.2. Rangos de CBR

Se presentan las siguientes tablas de la clasificación de la subrasante en función del CBR de acuerdo a Assis. A. (1988) y MTC (2013):

Tabla 3.4. Tabla de clasificación y uso del suelo según el valor de CBR

CBR %	Clasificación cualitativa del suelo
2 - 5	Muy mala
5 - 8	Mala
8 - 20	Regular – Buena
20 - 30	Excelente

Fuente: Assis. A. (1988).

Tabla 3.5. Categorías de Subrasante

Categorías de Subrasante	CBR
S ₀	CBR < 3%
S ₁	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%

S ₅	CBR ≥ 30%
----------------	-----------

Fuente: MTC (2013).

La subrasante natural es muy variable en toda la provincia, entonces, el CBR del terreno también será muy cambiante, además teniendo en cuenta las características de calidad que deben tener los materiales expresados en el *subcapítulo 2.1.3.* y las tablas anteriores se resolvió clasificar el valor del CBR como se muestra a continuación:

Tabla 3.6. Rangos de CBR

Clasificación de la subrasante	CBR %
S ₁	< 2
S ₂	≥ 2 < 5
S ₃	≥ 5 < 10
S ₄	≥ 10 < 15
S ₅	≥ 15 < 25
S ₆	≥ 25

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Assis. A. (1988), MTC (2013).

3.3. Descripción del programa comercial (Método AASHTO para el diseño de pavimentos 1993)

El programa comercial *Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)*, es un programa desarrollado por el ingeniero civil Luis Vásquez Varela, especialista en vías y transportes. El programa determina el espesor de las estructuras de pavimentos flexibles y rígidos, además, es posible calcular el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$) reales, dado un número estructural (SN) para pavimentos flexibles o un espesor (D) para pavimentos rígidos. Cabe destacar que el programa utiliza el sistema de unidades anglosajón o, dicho de otra manera, estas unidades se utilizan en Estados Unidos de América.

Es necesario enfatizar que se utilizará este programa solamente para el cálculo de estructuras de pavimentos rígidos, debido a que para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles el programa da como resultado estructuras con un espesor muy amplio de la capa de rodadura y sin subbase granular cuando el CBR es mayor o igual al 10%, lo que encarece el diseño.

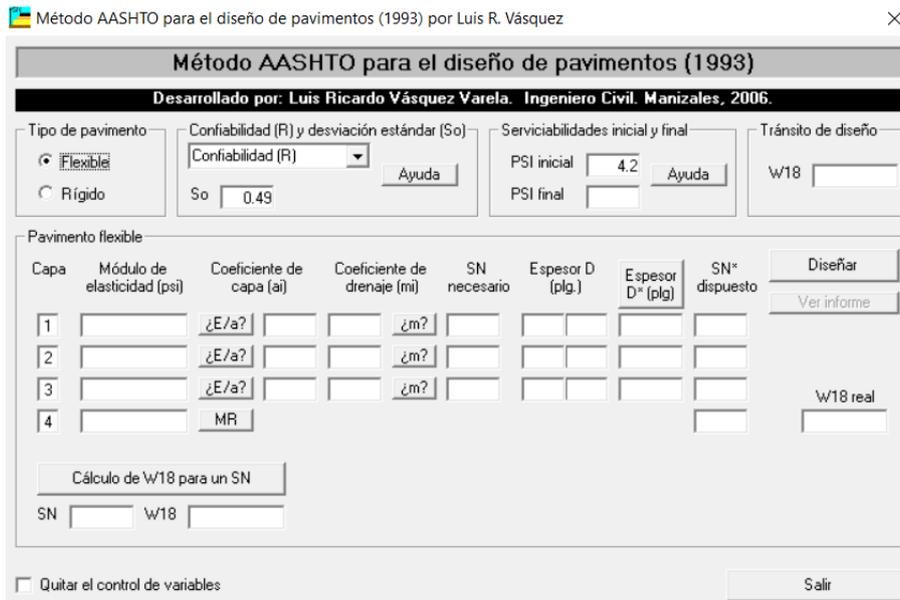


Figura 3.1. Interfaz del programa para pavimento flexible
Fuente: Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993).

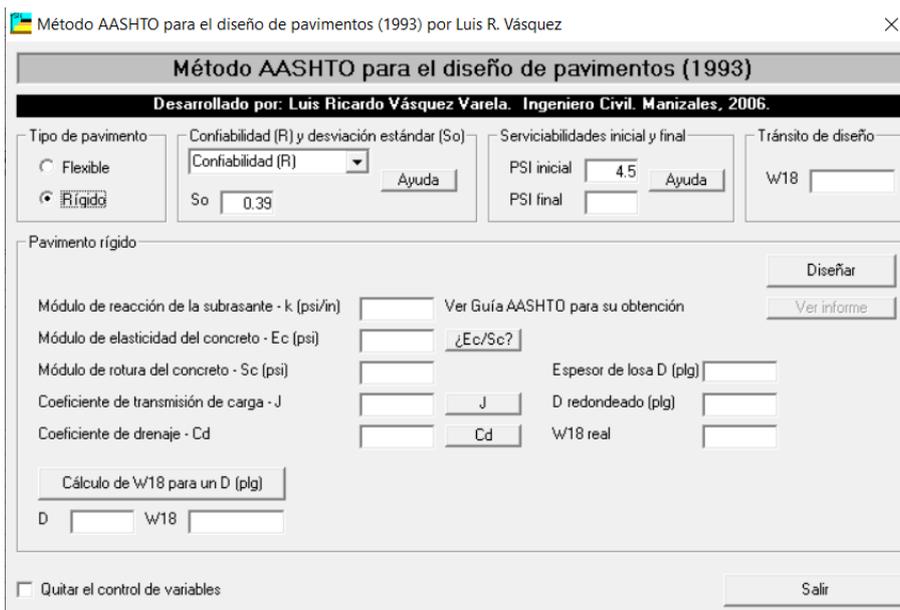


Figura 3.2. Interfaz del programa para pavimento rígido
Fuente: Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993).

3.3.1. Procedimiento de cálculo para pavimento rígido

3.3.1.1. Datos de entrada

- Confiabilidad (R) y desviación estándar (So): El programa establece por defecto el valor de la desviación normal integral (So) de 0.39, por lo que es necesario corregir

este valor de acuerdo a la metodología de diseño; se debe elegir el valor de la confiabilidad (R) en función del tipo de carretera.

- **Serviciabilidades inicial y final:** El programa establece por defecto el valor de la serviciabilidad inicial (P_i) de 4.5, se debe introducir el valor de la serviciabilidad final (P_f) en función del tipo de carretera.
- **Tránsito de diseño:** Este valor es el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas (W_{8.2}) que se obtiene mediante un estudio de tráfico previo de la carretera a diseñar.

Existen botones de “Ayuda” que despliegan ventanas que facilitan la elección de los parámetros o datos de entrada según el tipo de carretera que se esté diseñando como se muestra en la *figura 3.3* y la *figura 3.4*

Confiabilidad y desviación estándar

Clasificación funcional	Confiabilidad sugerida (R %)	
	Urbano	Rural
Interestatal y otras autopistas	85 – 99.9	80 – 99.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 95
Colectoras	80 – 95	75 – 95
Locales	50 - 80	50 – 80

Caso de análisis	Desviación estándar total (S _o)	
	Pavimento flexible	Pavimento rígido
Rango	0.40 – 0.50	0.30 – 0.40
Considerando la varianza del tránsito futuro	0.49 <input type="checkbox"/>	0.39 <input type="checkbox"/>
Sin considerar la varianza del tránsito futuro	0.44 <input type="checkbox"/>	0.34 <input type="checkbox"/>

Figura 3.3. Confiabilidad y desviación estándar
Fuente: Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993).

Serviciabilidad de diseño

$$\Delta PSI = PSI_{inicial} - PSI_{final}$$

Tipo de carretera	Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)			
	Pavimento flexible		Pavimento rígido	
	PSI _{INICIAL}	PSI _{FINAL}	PSI _{INICIAL}	PSI _{FINAL}
Carreteras principales		2.5	2.5	<input type="checkbox"/>
Carreteras secundarias	4.2	2.0	4.5	2.0 <input type="checkbox"/>
Condición de falla		1.5	1.5	<input type="checkbox"/>

Figura 3.4. Serviciabilidad de diseño en función del tipo de carretera
Fuente: Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993).

3.3.1.2. Información de la estructura

- Módulo de reacción de la subrasante – k (psi/plg)
- Módulo de elasticidad del concreto – E_c (psi)
- Módulo de rotura del concreto – S_c (psi)
- Coeficiente de transmisión de carga – J

Se define este parámetro en función del tipo de berma y de los dispositivos de transmisión de carga, como se presenta a continuación:

Coeficiente de transferencia de carga (J)

Berma	Asfáltica		Anclada y de concreto de cemento Pórtland	
	Si	No	Si	No
Dispositivos de transmisión de carga				
Pavimento con juntas Concreto simple o concreto reforzado	3.2	3.8 – 4.4	2.5 – 3.1	3.6 – 4.2
Pavimento de concreto continuamente reforzado	2.9 – 3.2	N/A	2.3 – 2.9	N/A

Copiar en la estructura Cancelar

Figura 3.5. Coeficiente de transferencia de carga en función del tipo de berma
Fuente: Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993).

- Coeficiente de drenaje (Cd)

El programa define un coeficiente de drenaje con un valor de 1.00 que corresponde a una calidad buena, sin embargo, se puede elegir este parámetro de acuerdo a la siguiente figura:

Coeficiente de drenaje (m)

Calidad del drenaje	El agua libre se remueve en...			
Excelente	2 horas			
Bueno	1 día			
Aceptable	1 semana			
Pobre	1 mes			
Muy pobre	El agua no drenará			

Copiar en la estructura Cancelar

Calidad: Bueno
Coeficiente (m): 1.00

Calidad del drenaje	% del tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a humedades cercanas a la saturación			
	Menos del 1%	1 - 5%	5 - 25%	Más del 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
Aceptable	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

Figura 3.6. Coeficientes de drenaje
Fuente: Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993).

3.3.1.3.Resultados

El programa calcula el espesor de la losa y el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$) real a través de las variables introducidas y entrega un informe detallado de la estructura.

3.4. Descripción del programa (Excel)

Este programa se realizó para el cálculo de diseño de estructuras de pavimento flexible, que fue desarrollado por las autoras de este trabajo de investigación, con el objetivo de realizar un análisis más específico de los espesores de las capas para economizar en el diseño cumpliendo con los criterios de resistencia estructural.

3.4.1. Procedimiento de cálculo para pavimento flexible

3.4.1.1.Datos de entrada

- Ejes equivalentes ($W_{8.2}$): Este valor es el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas ($W_{8.2}$) que se obtiene mediante un estudio de tráfico previo de la carretera a diseñar.
- CBR subrasante: Es el valor de soporte del suelo subrasante.
- Serviciabilidades inicial y final: El programa establece por defecto el valor de la serviciabilidad inicial (P_i) de 4.2 dado por la metodología AASHTO 93 y se debe introducir el valor de la serviciabilidad final (P_f) en función del tipo de carretera.
- Confiabilidad (R) y desviación normal estándar (Z_r): Se debe elegir el valor de la confiabilidad (R) en función del tipo de carretera.
- Desviación normal integral (S_0): El programa establece por defecto el valor de la desviación normal integral de 0.45 dado por la metodología AASHTO 93.

1. Variables de entrada		
Ejes equivalentes (W8,2)		ESALS
CBR subrasante		%
2. Serviciabilidad [Δ PSI]		
Pi	4.2	
Pt		
Δ PSI		
3. Confiabilidad [R] y desviación normal estándar [Zr]		
R		
Zr		
4. Desviación normal integral [So]		
So	0.45	

Figura 3.7. Datos de entrada
Fuente: Elaboración propia (2022).

3.4.1.2. Información de la estructura

- Módulo de resiliencia – M_r (lb/in²): este valor se encuentra en función del CBR de la subrasante y para su cálculo se tomó la *ecuación 2.12*.
- Número estructural – SN: es necesario imponerse un número estructural hasta que el segundo miembro de la ecuación dada por la AASHTO 93 sea mayor o igual al primer miembro de la ecuación.
- Diseño de la estructura de pavimento: el programa presenta los coeficientes estructurales (a_i) y el drenaje (m_i) para cada capa que conforma la estructura de pavimento.

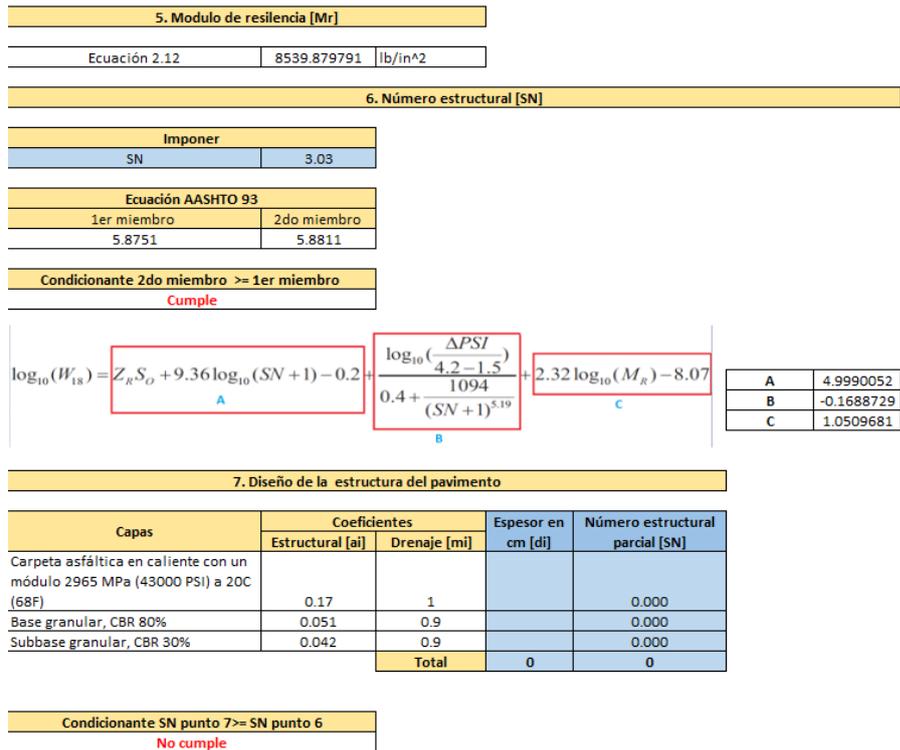


Figura 3.8. Información de la estructura
Fuente: Elaboración propia (2022).

3.4.1.3. Resultados

- Se debe imponer los espesores de cada capa estructural (di), considerando los valores mínimos establecidos en la *tabla 2.19*, para obtener el número estructural parcial (SN), en donde la sumatoria de estos debe ser mayor o igual al número estructural obtenido mediante la ecuación de la AASHTO.

3.5. Criterios de diseño establecidos para el desarrollo del catálogo

A continuación, se presentan los parámetros definitivos que serán utilizados en la metodología de diseño para las estructuras de pavimentos flexibles y rígidos; su selección se ha dado basado en un análisis de bibliografía y Normativa, además, se realizaron varias entrevistas a los ingenieros Rodrigo Carvalho, Flavio Albarracín y Carlos Orellana, especialistas en pavimentos que, con su experiencia, ayudaron a la selección de estos parámetros.

3.5.1. Pavimento flexible

- **Serviciabilidad final (P_t):** para el desarrollo del catálogo de secciones estructurales de pavimentos flexibles y rígidos se utilizará el promedio de los valores recomendados para cada categoría de vía $P_t = 2.5$
- **Confiabilidad (R) y desviación normal estándar (Z_r):** se utilizará $R=85\%$ y $Z_r=-1.037$ debido a que estos valores se encuentran dentro del rango de la mayoría de las carreteras a estudiar.
- **Coefficiente estructural de capa (a_i):** para la capa de rodadura se utilizará una carpeta asfáltica en caliente con un módulo 2965 MPa (430000 PSI) a 20°C (68°F) y un $a_1=0.440$ /plg. Además, para el diseño de la base granular se utilizará un CBR=80% y un $a_2=0.131$ /plg y para la subbase granular se utilizará un CBR=30% con un $a_3=0.107$ /plg, cabe recalcar que los valores de CBR para la base y subbase son los mínimos admisibles de acuerdo a la Normativa Nacional, por lo que, el diseño se encuentra del lado de la seguridad.
- **Coefficiente de drenaje (m_i):** se utilizará un coeficiente de drenaje $m_i = 0.9$ para las capas de base y subbase. De acuerdo a C. Orellana (comunicación personal, 7 de junio, 2022) es mejor utilizar un coeficiente de drenaje de 0.9 para las capas granulares, debido a que, las condiciones climáticas son diferentes dentro de la provincia del Azuay.

3.5.2. Pavimento rígido

- **Serviciabilidad final (P_t):** para el desarrollo del catálogo de secciones estructurales de pavimentos flexibles y rígidos se utilizará el promedio de los valores recomendados para cada categoría de vía $P_t = 2.5$
- **Confiabilidad (R) y desviación normal estándar (Z_r):** se utilizará $R=85\%$ y $Z_r=-1.037$ debido a que estos valores se encuentran dentro del rango de la mayoría de las carreteras a estudiar.
- **Módulo de reacción de la superficie (k):** se utilizará la *ecuación 2.20*, el espesor de la subbase granular será de $h=20$ y los coeficientes de reacción k_1 y k_0 se los puede determinar mediante la aplicación de las *ecuaciones 2.18 y 2.19*.

- **Coefficiente de drenaje (C_{dx}):** se utilizará $C_{dx} = 1.00$ porque en la provincia del Azuay las precipitaciones en un año son mayores que el 25%
- **Resistencia a la compresión simple del concreto ($f'c$):** se utilizará $f'c=300$ kg/cm^2 , que servirá para el cálculo de la resistencia media del concreto (M_r) y el módulo de elasticidad del concreto (E_c), a través de las ecuaciones 2.21 y 2.22 respectivamente. De acuerdo a R. Carvallo (comunicación personal, 6 de mayo, 2022) no es recomendable utilizar un $f'c > 300$ kg/cm^2 , debido a que, el pavimento tiende a fisurarse.
- **Coefficiente de transmisión de cargas en las juntas (J):** se utilizarán todos los valores J que estarán en función del número de ESALs, debido a que, dentro de la red vial de la provincia del Azuay las bermas son de concreto hidráulico, granulares o asfálticas.

3.6. Catálogo de números estructurales (SN) de pavimentos flexibles para las carreteras de la provincia del Azuay, período de diseño 10 años

Tabla 3.7. Número estructural (SN) requerido para pavimentos flexibles en función del tráfico ESAL's y CBR de la subrasante, periodo de diseño 10 años

ESAL's (W_{18})	CBR %					
	< 2	$\geq 2 < 5$	$\geq 5 < 10$	$\geq 10 < 15$	$\geq 15 < 25$	> 25
$\leq 120,000$	3.34	2.81	2.23	1.87	1.68	1.45
$> 120,000$ $\leq 300,000$	3.88	3.27	2.6	2.19	1.97	1.71
$> 300,000$ $\leq 600,000$	4.32	3.66	2.92	2.45	2.22	1.93
$> 600,000$ $\leq 1'200,000$	4.79	4.09	3.27	2.75	2.49	2.17
$> 1'200,000$ $\leq 3'000,000$	5.45	4.7	3.8	3.2	2.9	2.52
$> 3'000,000$ $\leq 5'000,000$	5.84	5.06	4.12	3.48	3.15	2.75
$> 5'000,000$ $\leq 8'000,000$	6.22	5.4	4.43	3.76	3.4	2.97

> 8'000,000	6.4	5.57	4.58	3.9	3.53	3.08
≤ 10'000,000						
> 10'000,000	6.48	5.64	4.64	3.96	3.59	3.13

Fuente: Elaboración propia (2022).

3.7. Catálogo de estructuras

3.7.1. Cartas de diseño

Las cartas de diseño para la presentación de las estructuras de pavimentos se muestran a continuación:

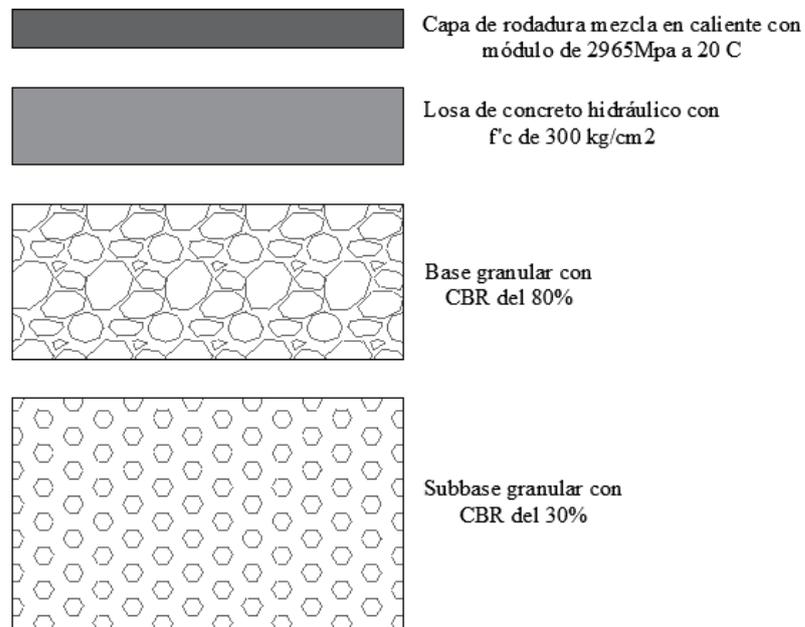
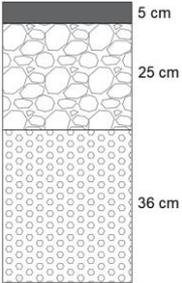
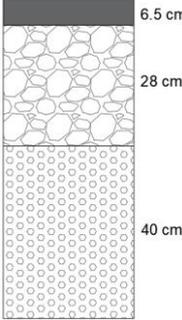
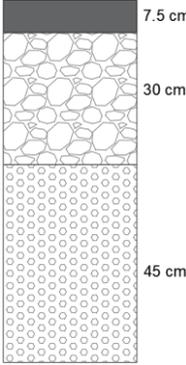
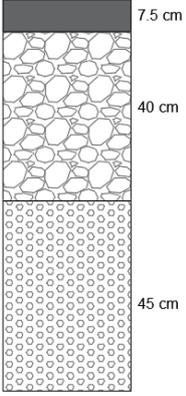
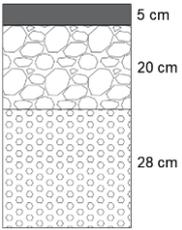
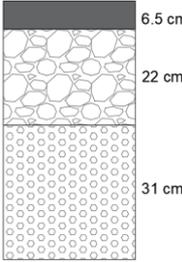
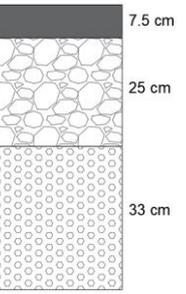
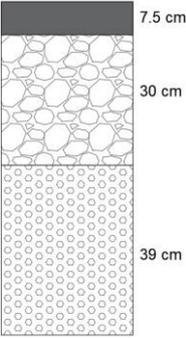
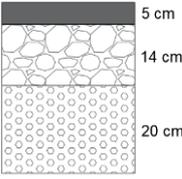
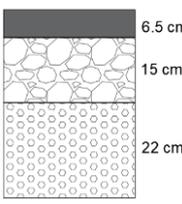
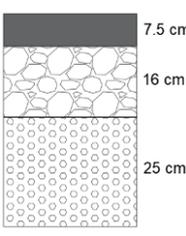
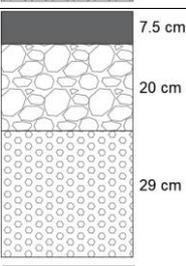
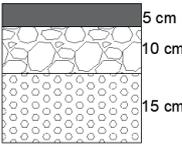
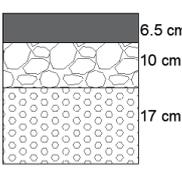
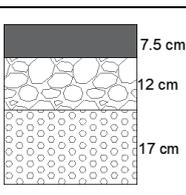
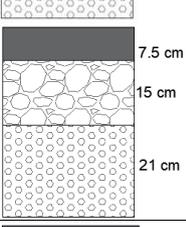
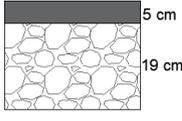
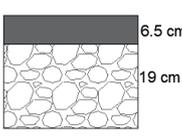
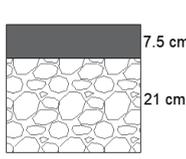
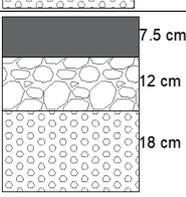
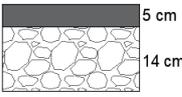
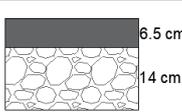
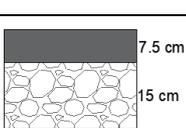
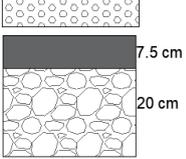


Figura 3.9. Cartas de diseño para las alternativas estructurales

Fuente: Elaboración propia (2022).

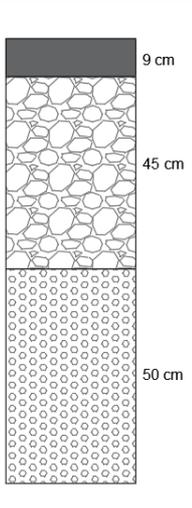
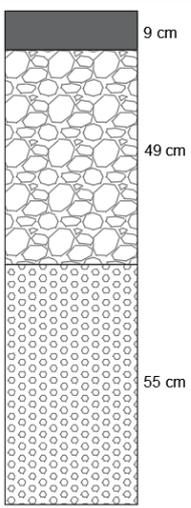
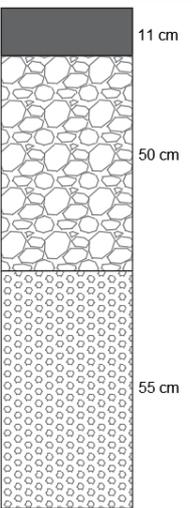
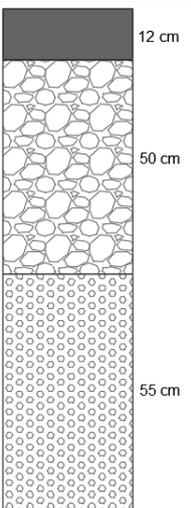
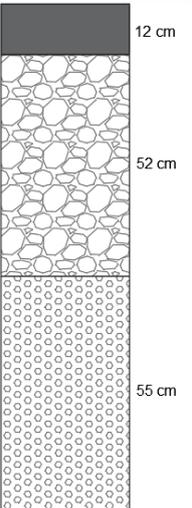
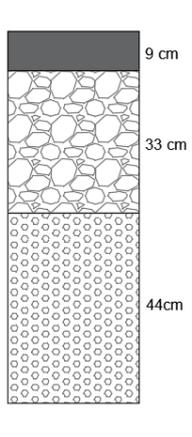
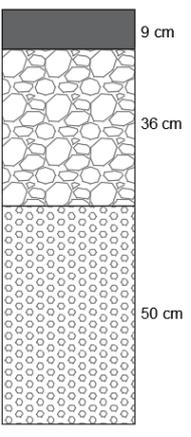
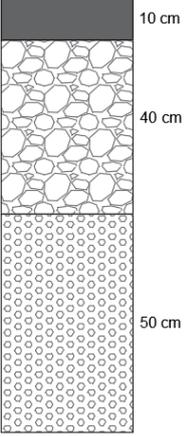
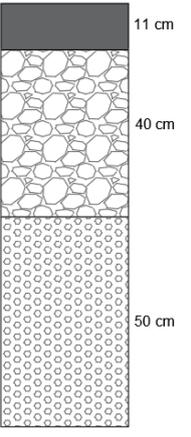
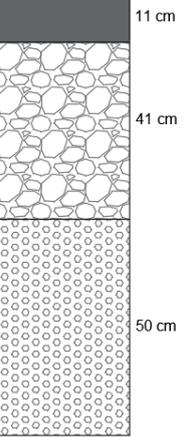
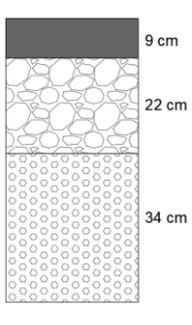
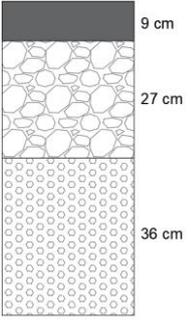
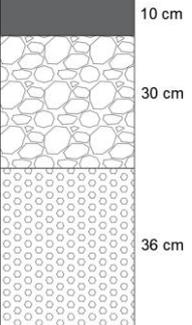
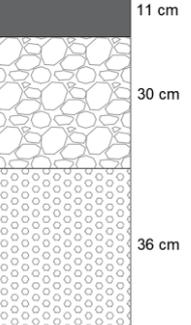
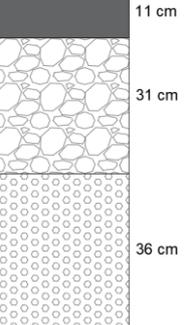
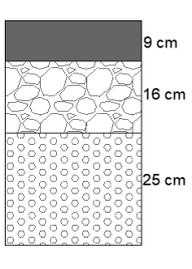
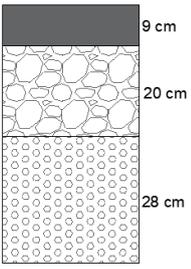
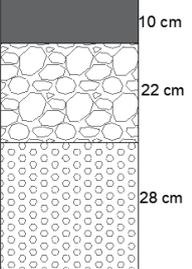
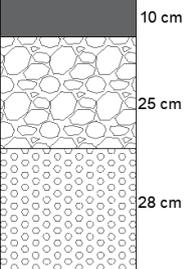
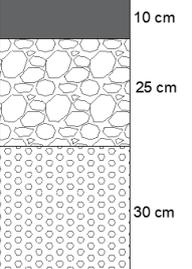
3.7.2. Catálogo de ilustraciones de estructuras de pavimentos flexibles para las carreteras de la provincia del Azuay, período de diseño 10 años

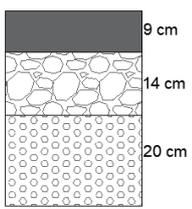
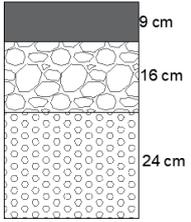
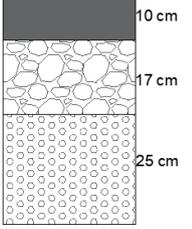
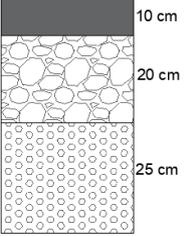
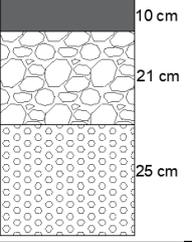
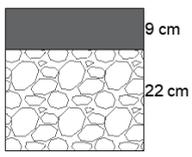
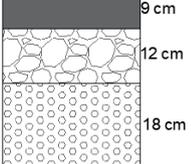
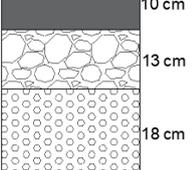
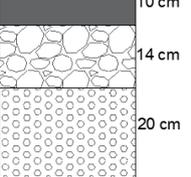
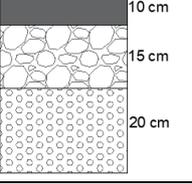
Tabla 3.8. Catálogo de estructuras de pavimento flexible desde el tráfico T1 hasta el tráfico T4

CBR %		Catálogo de estructuras de pavimento flexible en función del tráfico ESALs y CBR de la subrasante			
		T1 ≤ 120,000	T2 > 120,000 ≤ 300,000	T3 > 300,000 ≤ 600,000	T4 > 600,000 ≤ 1'200,000
S1	< 2				
					
S3	≥ 5 < 10				
					
S5	≥ 15 < 25				
					

Fuente: Elaboración propia, adaptada de la ecuación AASHTO 93 (2022).

Tabla 3.9. Catálogo de estructuras de pavimento flexible desde el tráfico T5 hasta el tráfico T9

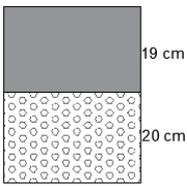
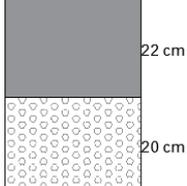
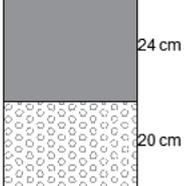
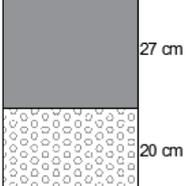
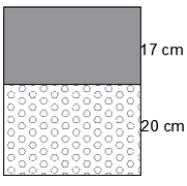
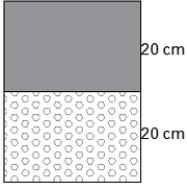
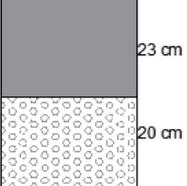
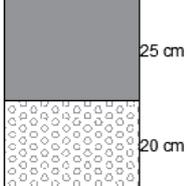
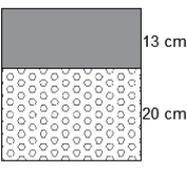
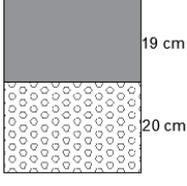
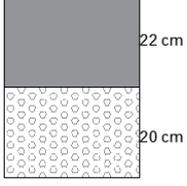
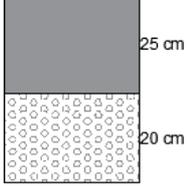
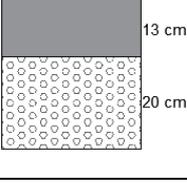
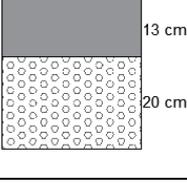
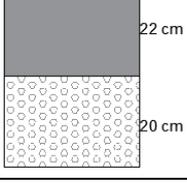
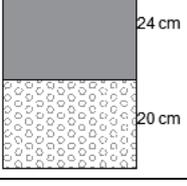
CBR %		Catálogo de estructuras de pavimento flexible en función del tráfico ESALs y CBR de la subrasante				
		T5 > 1'200,000 ≤ 3'000,000	T6 > 3'000,000 ≤ 5'000,000	T7 > 5'000,000 ≤ 8'000,000	T8 > 8'000,000 ≤ 10'000,000	T9 > 10'000,000
S 1	< 2					
						
						
						

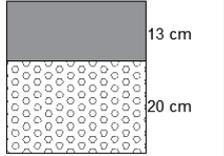
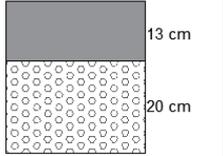
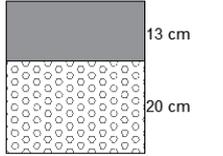
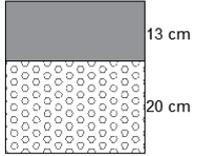
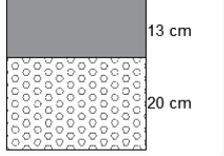
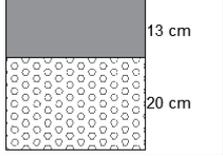
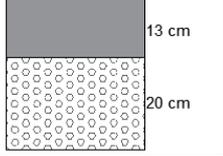
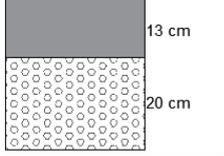
S 5	≥ 15 < 25					
						

Fuente: Elaboración propia, a base de la ecuación AASHTO 93 (2022).

3.7.3. Catálogo de ilustraciones de estructuras de pavimentos rígidos para las carreteras de la provincia del Azuay, período de diseño 20 años

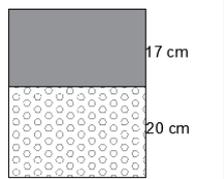
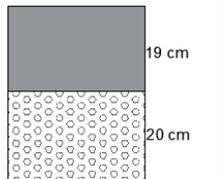
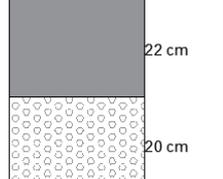
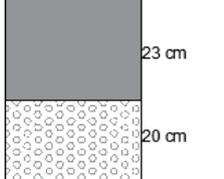
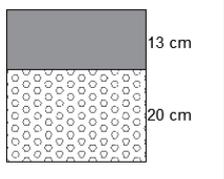
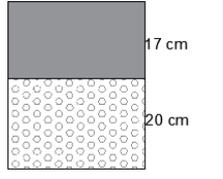
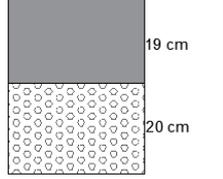
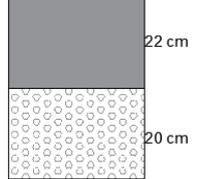
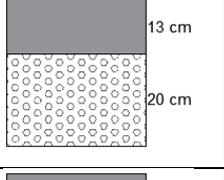
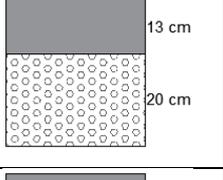
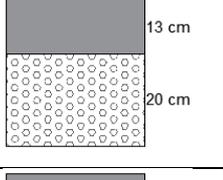
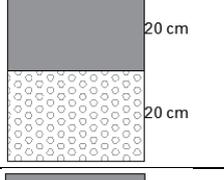
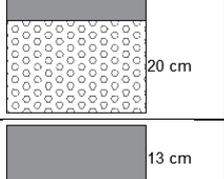
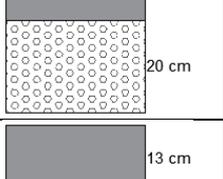
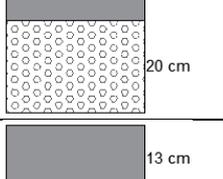
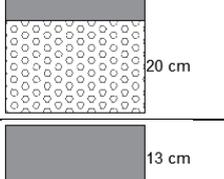
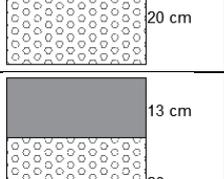
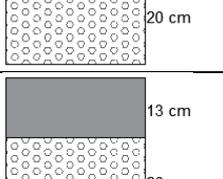
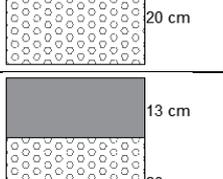
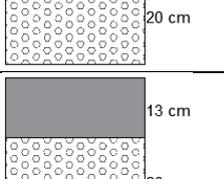
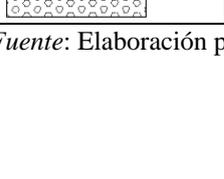
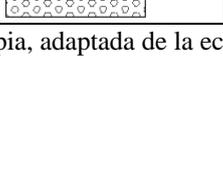
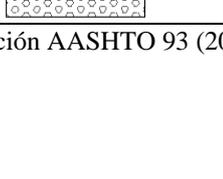
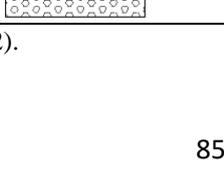
Tabla 3.10. Catálogo de estructuras de pavimento rígido con bermas de concreto hidráulico sin pasadores

CBR %		Catálogo de estructuras de pavimento rígido en función del tráfico ESALs y CBR de la subrasante con bermas de concreto hidráulico, sin pasadores (J=3.8)			
		T1 $\leq 300,000$	T2 $> 300,000$ $\leq 750,000$	T3 $> 750,000$ $\leq 1'500,000$	T4 $> 1'500,000$ $\leq 3'000,000$
S1	< 2				
					
S3	≥ 5 < 10				
					

S5	$\geq 15 < 25$				
S6	> 25				

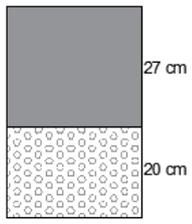
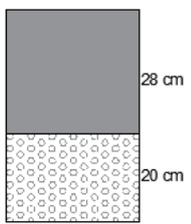
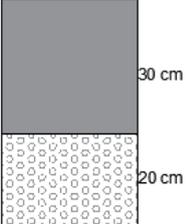
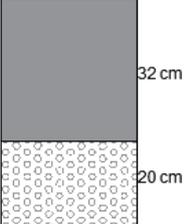
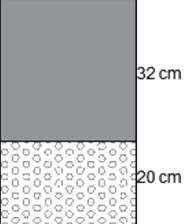
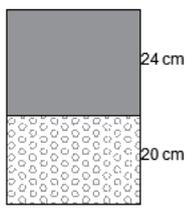
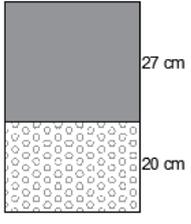
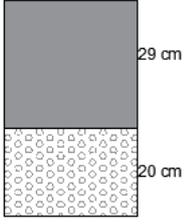
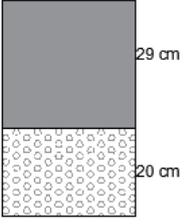
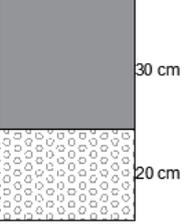
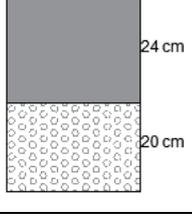
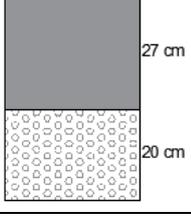
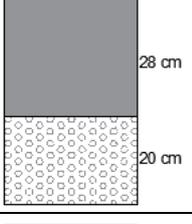
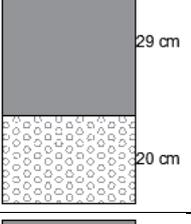
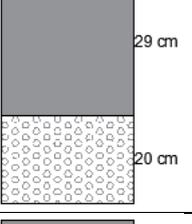
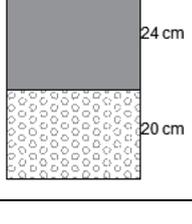
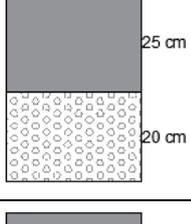
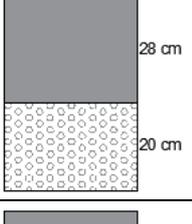
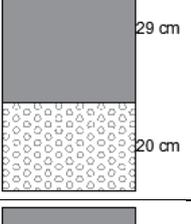
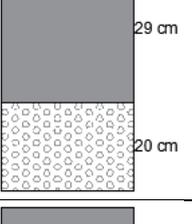
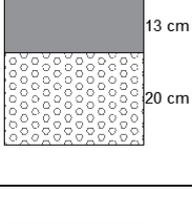
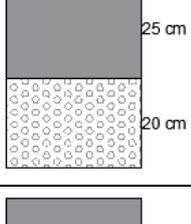
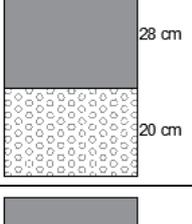
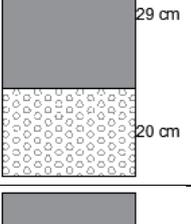
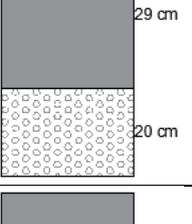
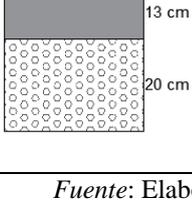
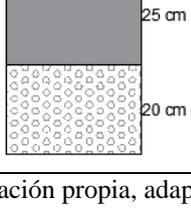
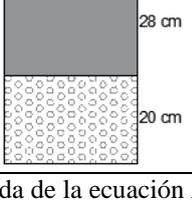
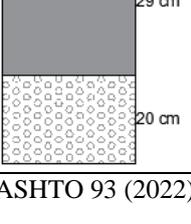
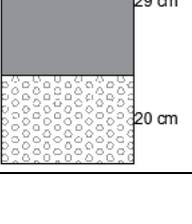
Fuente: Elaboración propia, adaptada de la ecuación AASHTO 93 (2022).

Tabla 3.11. Catálogo de estructuras de pavimento rígido con bermas de concreto hidráulico con pasadores desde el tráfico T1 hasta el tráfico T4

CBR %		Catálogo de estructuras de pavimento rígido en función del tráfico ESALs y CBR de la subrasante con bermas de concreto hidráulico, con pasadores (J=2.8)			
		T1 $\leq 300,000$	T2 $> 300,000$ $\leq 750,000$	T3 $> 750,000$ $\leq 1'500,000$	T4 $> 1'500,000$ $\leq 3'000,000$
S1	< 2				
S2	$\geq 2 < 5$				
S3	$\geq 5 < 10$				
S4	$\geq 10 < 15$				
S5	$\geq 15 < 25$				
S6	> 25				

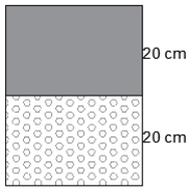
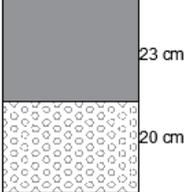
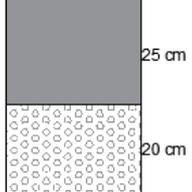
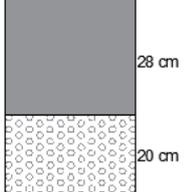
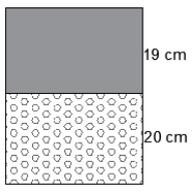
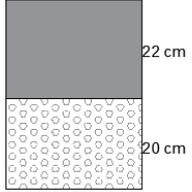
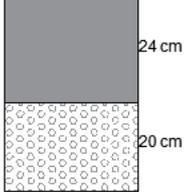
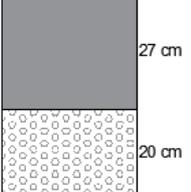
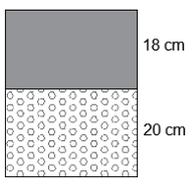
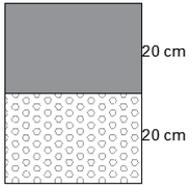
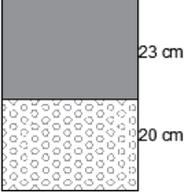
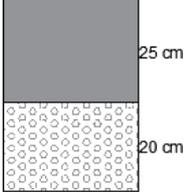
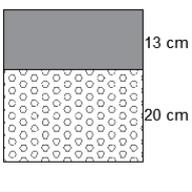
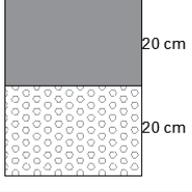
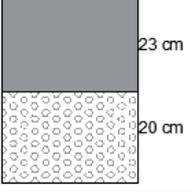
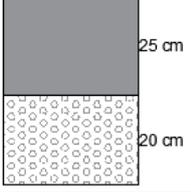
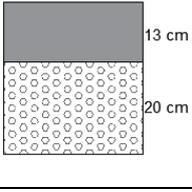
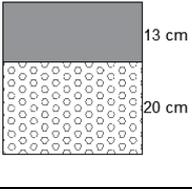
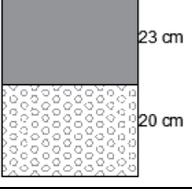
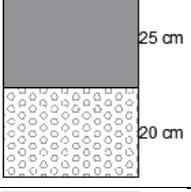
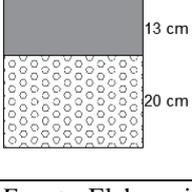
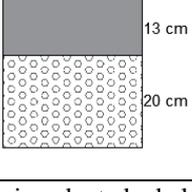
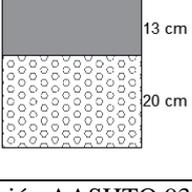
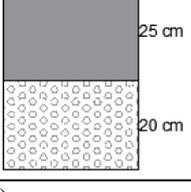
Fuente: Elaboración propia, adaptada de la ecuación AASHTO 93 (2022).

Tabla 3.12. Catálogo de estructuras de pavimento rígido con bermas de concreto hidráulico con pasadores desde el tráfico T5 hasta el tráfico T9

		Catálogo de estructuras de pavimento rígido en función del tráfico ESALs y CBR de la subrasante con bermas de concreto hidráulico, con pasadores (J=2.8)				
CBR %		T5	T6	T7	T8	T9
		> 3'000,000 ≤ 7'500,000	> 7'500,000 ≤ 12'000,000	> 12'000,000 ≤ 20'000,000	> 20'000,000 ≤ 25'000,000	> 25'000,000
S 1	< 2					
S 2	≥ 2 < 5					
S 3	≥ 5 < 10					
S 4	≥ 10 < 15					
S 5	≥ 15 < 25					
S 6	> 25					

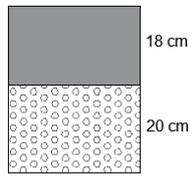
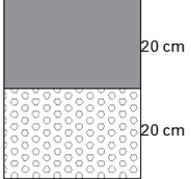
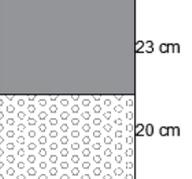
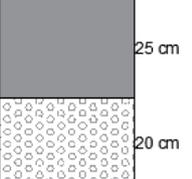
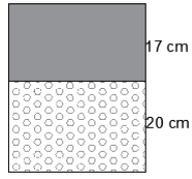
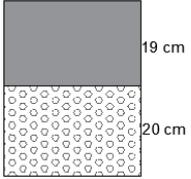
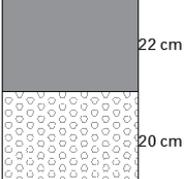
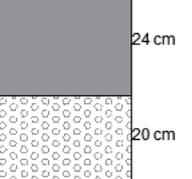
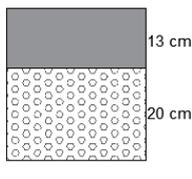
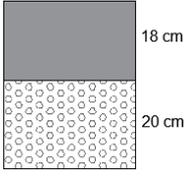
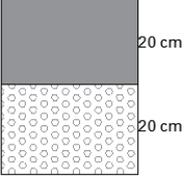
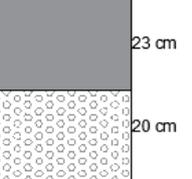
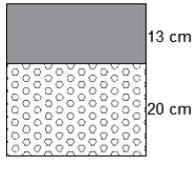
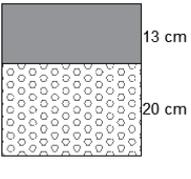
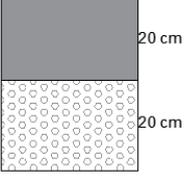
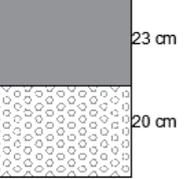
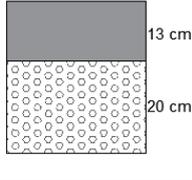
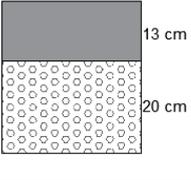
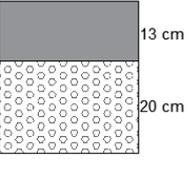
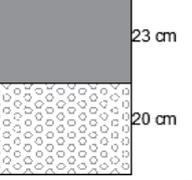
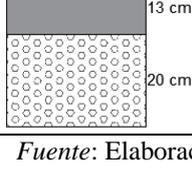
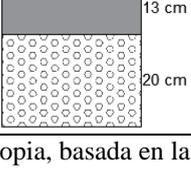
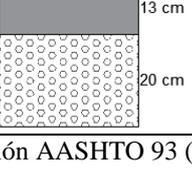
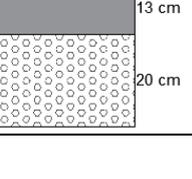
Fuente: Elaboración propia, adaptada de la ecuación AASHTO 93 (2022).

Tabla 3.13. Catálogo de estructuras de pavimento rígido con bermas granulares o asfálticas sin pasadores

CBR %		Catálogo de estructuras de pavimento rígido en función del tráfico ESALs y CBR de la subrasante con bermas granulares o asfálticas, sin pasadores (J=4)			
		T1 ≤ 300,000	T2 > 300,000 ≤ 750,000	T3 > 750,000 ≤ 1'500,000	T4 > 1'500,000 ≤ 3'000,000
S1	< 2				
S2	≥ 2 < 5				
S3	≥ 5 < 10				
S4	≥ 10 < 15				
S5	≥ 15 < 25				
S6	> 25				

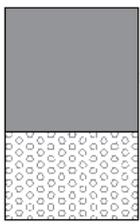
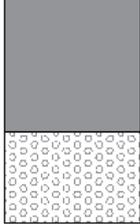
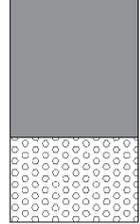
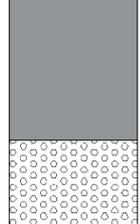
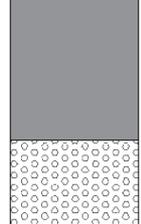
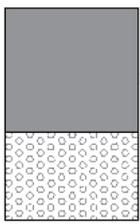
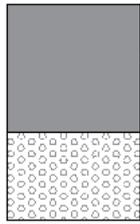
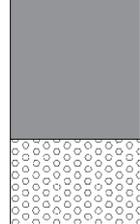
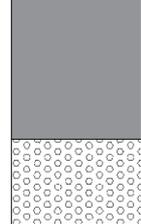
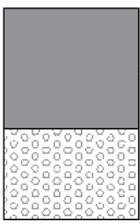
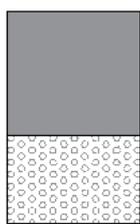
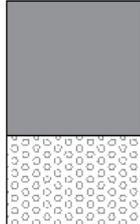
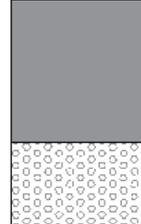
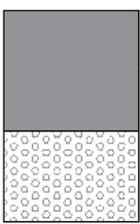
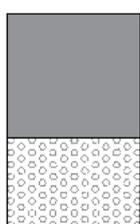
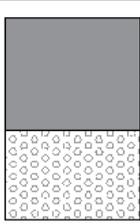
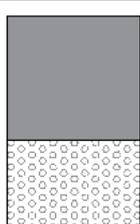
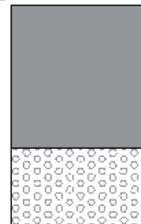
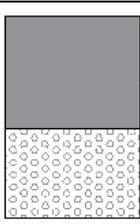
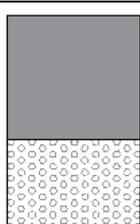
Fuente: Elaboración propia, adaptada de la ecuación AASHTO 93 (2022).

Tabla 3.14. Catálogo de estructuras de pavimento rígido con bermas granulares o asfálticas con pasadores desde el tráfico T1 hasta el tráfico T4

CBR %		Catálogo de estructuras de pavimento rígido en función del tráfico ESALs y CBR de la subrasante con bermas granulares o asfálticas, con pasadores (J=3.2)			
		T1 ≤ 300,000	T2 > 300,000 ≤ 750,000	T3 > 12'000,000 ≤ 20'000,000	T4 > 1'500,000 ≤ 3'000,000
S1	<2				
S2	≥2 <5				
S3	≥5 <10				
S4	≥10 <15				
S5	≥15 <25				
S6	>25				

Fuente: Elaboración propia, basada en la ecuación AASHTO 93 (2022).

Tabla 3.15. Catálogo de estructuras de pavimento rígido con bermas granulares o asfálticas con pasadores desde el tráfico T5 hasta el tráfico T9

CBR %		Catálogo de estructuras de pavimento rígido en función del tráfico ESALs y CBR de la subrasante con bermas granulares o asfálticas, con pasadores (J=3.2)				
		T5 > 3'000,000 ≤ 7'500,000	T6 > 7'500,000 ≤ 12'000,000	T7 > 12'000,000 ≤ 20'000,000	T8 > 20'000,000 ≤ 25'000,000	T9 > 25'000,000
S1	<2					
S2	≥2 <5					
S3	≥5 <10					
S4	≥10 <15					
S5	≥15 <25					
S6	>25					

Fuente: Elaboración propia, adaptada de la ecuación AASHTO 93 (2022).

CAPÍTULO 4

Comparación del catálogo de secciones estructurales para pavimentos con estudios realizados dentro de la provincia del Azuay

Este capítulo basa su análisis comparativo entre los espesores de las capas estructurales de pavimentos flexibles y rígidos de algunos estudios realizados dentro de la provincia del Azuay y el catálogo de secciones estructurales elaborado en el capítulo anterior, considerando las variables de entrada como el tráfico ESAL's y el CBR de diseño de la subrasante. Los estudios se adquirieron de fuentes como el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Cuenca, Gobierno Provincial del Azuay y consultores privados.

4.1. Cartas de diseño

Las cartas de diseño para la presentación de las estructuras de pavimentos de los estudios y tesis se muestran a continuación:

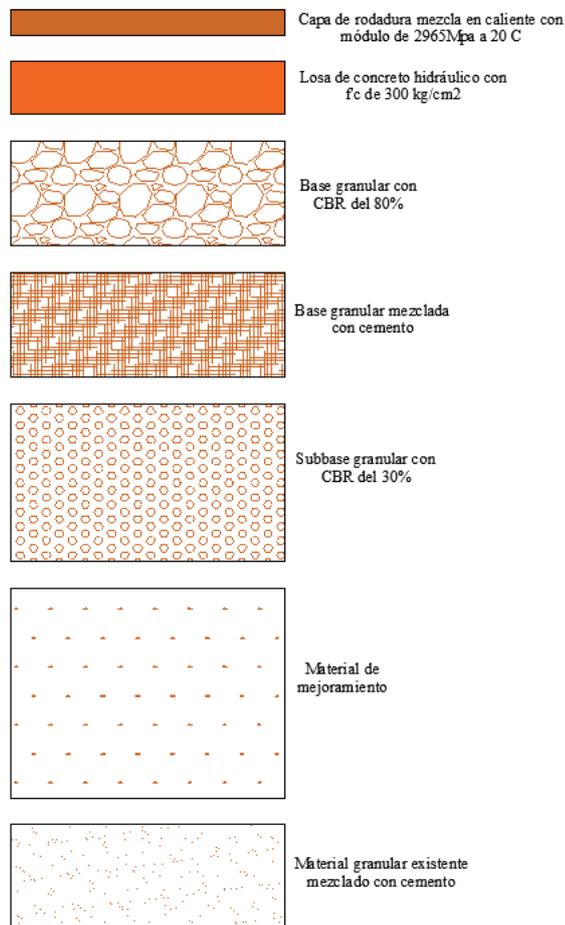
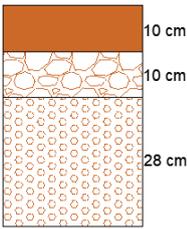
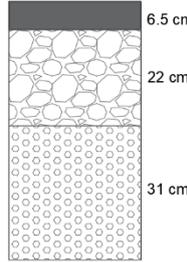


Figura 4.1. Cartas de diseño para las alternativas estructurales de los estudios y tesis
Fuente: Elaboración propia (2022).

4.2. Revisión de los estudios de pavimentos flexibles

4.2.1. Estudio de tráfico, diseño geométrico, diseño hidrológico, drenaje, diseño de pavimento y presupuesto de la vía San Fernando - Yaguarcocha, cantón San Fernando – provincia del Azuay, longitud de 4 kilómetros

Tabla 4.1. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía San Fernando – Yaguarcocha y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
285,444	2.5	3.38		$> 120,000$ $\leq 300,000$	$\geq 2 < 5$	3.27	

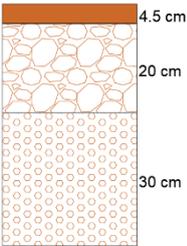
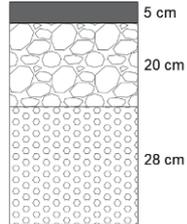
Nota: Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales son diferentes y los números estructurales (SN) varían en un 3.25%, por lo que son muy similares; esto quiere decir que no importa la diferencia de los espesores de las capas, siempre y cuando se cumpla con los números estructurales, dicha distribución va a depender de la economía y el entorno.

La carpeta asfáltica con valores superiores favorece a que las capas granulares puedan tener un menor espesor.

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Peña Cabrera y Cabrera Guambaña (2016).

4.2.2. Diseño de un tramo vial, obras complementarias de ingeniería y presupuesto de construcción de una carretera rural, aplicada a la vía Cauquil-Parcuspamba, perteneciente al cantón Girón (2 km)

Tabla 4.2. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la vía Cauquil-Parcuspamba y el catálogo de la tabla 3.7

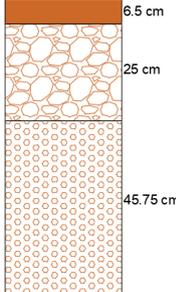
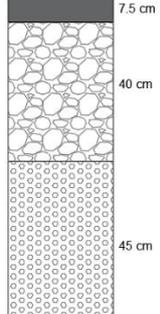
Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
93,367	3.15	2.8		$\leq 120,000$	$\geq 2 < 5$	2.81	

Nota: Se puede observar que en el estudio el número estructural varía en un 0.36% con respecto al catálogo, por lo que los espesores de las capas son similares.

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Torres Maldonado (2018).

4.2.3. Mejoramiento, diseño vial y de pavimento flexible de la vía Parcoloma-San Bartolo- Octavio Cordero Palacios

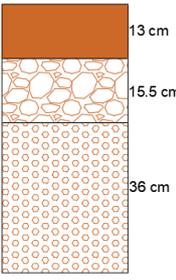
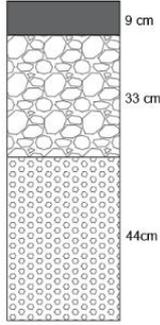
Tabla 4.3. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la vía Parcoloma-San Bartolo- Octavio Cordero Palacios y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
1'003,788	1.80	4.44		$> 600,000$ $\leq 1'200,000$	< 2	4.79	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales son diferentes y el número estructural del catálogo varía en un 7.88% con respecto al estudio, por lo que se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia se debe a que la desviación normal integral del estudio tiene un valor de 0.40, la serviciabilidad final es de 2 y los coeficientes estructurales de las capas de carpeta, base y subbase son de 0.40, 0.134 y 0.109 respectivamente.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Molina Andrade (2015).

4.2.4. Diseños definitivos de las calles Salto de la Soga, Juego de la Pallca y Juego de Ajedrez, incluye diseño geométrico, de pavimentos y muros de contención

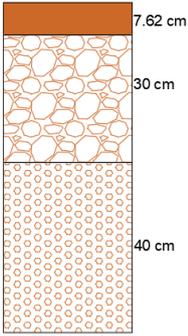
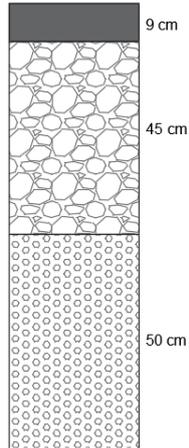
Tabla 4.4. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de las calles Salto de la Soga, Juego de la Pallca y Juego de Ajedrez y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
1'753,563	3.40	3.95		$>$ 1'200,000 \leq 3'000,000	$\geq 2 < 5$	4.07	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales son diferentes y el número estructural del catálogo varía en un 3.04 % con respecto al estudio, por lo que se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 65%, la serviciabilidad final es de 2, los coeficientes estructurales de las capas de carpeta, base y subbase son de 0.35, 0.135 y 0.11 respectivamente y los coeficientes de drenaje para las capas granulares de base y subbase es de 0.60.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Cedillo Vargas (2022).

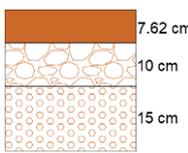
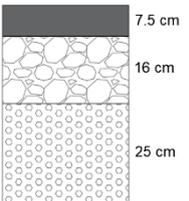
4.2.5. Diseño de pavimentos y análisis económico de la calle Paseo Tres de Noviembre y de la calle Colombia, de la ciudad de Cuenca

Tabla 4.5. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Paseo Tres de Noviembre de la ciudad de Cuenca y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
1'210,076	1.70	4.88		$> 1'200,000$ $\leq 3'000,000$	< 2	5.45	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales son diferentes y el número estructural del catálogo varía en un 11.68% con respecto al estudio, por lo que se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 90%, la serviciabilidad final es de 2, los coeficientes estructurales de las capas de carpeta, base y subbase son de 0.42, 0.135 y 0.11 respectivamente y los coeficientes de drenaje para las capas granulares de base y subbase es de 1.1.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Cárdenas Carpio (2014).

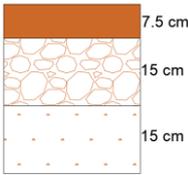
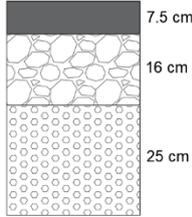
Tabla 4.6. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Colombia de la ciudad de Cuenca y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
430,517	8	2.48		$> 300,000$ $\leq 600,000$	≥ 5 < 10	2.92	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales son diferentes y el número estructural del catálogo varía en un 17.74% con respecto al estudio, por lo que se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 90%, la serviciabilidad final es de 2, los coeficientes estructurales de las capas de carpeta, base y subbase son de 0.42, 0.135 y 0.11 respectivamente y los coeficientes de drenaje para las capas granulares de base y subbase es de 1.1.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Cárdenas Carpio (2014).

4.2.6. Estudios geométricos, diseño de pavimentos y levantamientos topográficos de la calle Rafael Aguilar de la parroquia El Batán

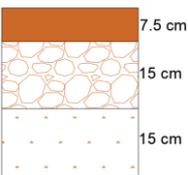
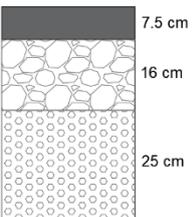
Tabla 4.7. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la calle Rafael Aguilar y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
523,299	8.5	2.55		$> 300,000$ $\leq 600,000$	≥ 5 < 10	2.92	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales son diferentes y el número estructural del catálogo varía en un 14.51% con respecto al estudio, por lo que se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 50%, la serviciabilidad final es de 2, los coeficientes estructurales de las capas de carpeta, base y mejoramiento son de 0.170, 0.051 y 0.035 respectivamente y el coeficiente de drenaje para las capas granulares es de 1.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SueloTec (2020).

4.2.7. Estudios geométricos, diseño de pavimentos y levantamientos topográficos de la calle Fernando Pazan de la parroquia Machángara

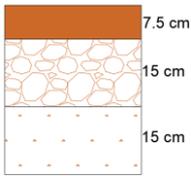
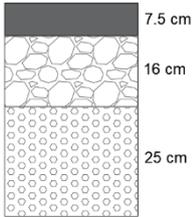
Tabla 4.8. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la calle Fernando Pazan y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
523,299	6.2	2.27		$> 300,000$ $\leq 600,000$	≥ 5 < 10	2.92	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales son diferentes y los números estructurales (SN) varían en un 28.63% con respecto al estudio, por lo que se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 50%, la serviciabilidad final es de 2, los coeficientes estructurales de las capas de carpeta, base y mejoramiento son de 0.170, 0.051 y 0.035 respectivamente y el coeficiente de drenaje para las capas granulares es de 1.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SueloTec (2020).

4.2.8. Estudios geométricos, diseño de pavimentos y levantamientos topográficos de la calle De las Pomarosas de la parroquia San Sebastián

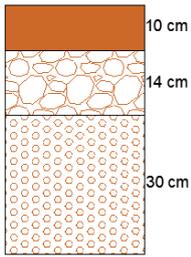
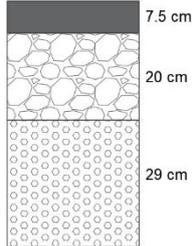
Tabla 4.9. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía Tendales – Alpacruz y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
523,299	5.7	2.34		$> 300,000$ $\leq 600,000$	≥ 5 < 10	2.92	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales son diferentes y el número estructural del catálogo varía en un 24.79% con respecto al estudio, por lo que se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 50%, la serviciabilidad final es de 2, los coeficientes estructurales de las capas de carpeta, base y mejoramiento son de 0.170, 0.051 y 0.035 respectivamente y el coeficiente de drenaje para las capas granulares es de 1.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SueloTec (2020).

4.2.9. Diseños definitivos para el mejoramiento de la vía Centro Parroquial, Santa Catalina, el Despacho, Santa Sofía y Guncay de la parroquia de El Valle

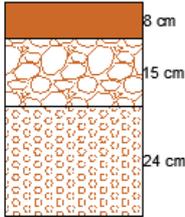
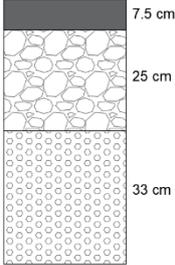
Tabla 4.10. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía Centro Parroquial, Santa Catalina, el Despacho, Santa Sofía y Guncay y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
1'015,786	5	3.80		$> 600,000$ $\leq 1'200,000$	≥ 5 < 10	3.27	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales son diferentes y el número estructural del estudio varía en un 13.95% con el catálogo, por lo que después de realizar el análisis de la tesis se concluyó que las diferencias en los espesores se deben a que en el estudio se elige un drenaje de 1 en las capas granulares y deciden colocar un espesor mayor al mínimo lo que hace que los espesores de las capas granulares se reduzcan.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Arévalo Moscoso & Prieto Centeno (2018).

4.2.10. Estudio y diseño definitivo a nivel de pavimento flexible de la vía La Unión – El Progreso – Mollepongo de la parroquia Pucara, cantón Pucara desde la abscisa 0+000 hasta la abscisa 5+043

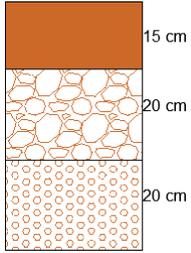
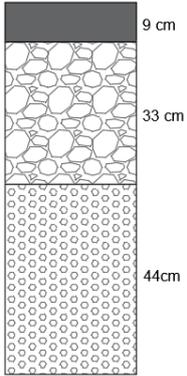
Tabla 4.11. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía La Unión – El Progreso – Mollepongo y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
371,339	3.5	2.88		$> 300,000$ $\leq 600,000$	$\geq 2 < 5$	3.66	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales son diferentes y el número estructural del catálogo varía en un 27.08% con respecto al estudio, por lo que se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia se debe a que los parámetros de diseño son diferentes. La serviciabilidad final del estudio tiene un valor de 2 y la confiabilidad corresponde a un 70%. Además, en el estudio se otorga un CBR de 40% a la subbase granular lo cual hace que el espesor de la misma se reduzca considerablemente.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Ávila Sanmartín (2015).

4.2.11. Diseño de la vía periurbana Las Cuadras – Capillapamba, para el cantón Chordeleg

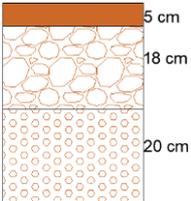
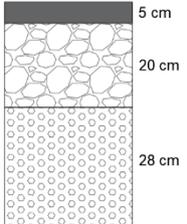
Tabla 4.12. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía Las Cuadras – Capillapamba y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
2'870,000	3.93	4.45		$> 1'200,000$ $\leq 3'000,000$	$\geq 2 < 5$	4.7	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales son diferentes y los números estructurales (SN) varían en un 5.62%, por lo que son similares, esto quiere decir que no importa la diferencia de los espesores de las capas, siempre y cuando se cumpla con los números estructurales, dicha distribución va a depender de la economía y el entorno. El espesor de la carpeta asfáltica es muy superior al del catálogo lo que hace que las capas de base y subbase disminuyan notablemente.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Castillo Villavicencio & Montenegro Reinoso (2018).

4.2.12. Diseño geométrico y de pavimentos de la vía “Camino a Ucholoma” de la parroquia de Baños, cantón Cuenca

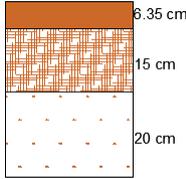
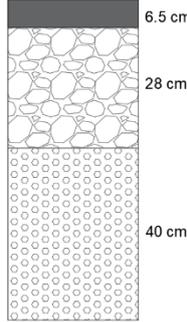
Tabla 4.13. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía Camino a Ucholoma y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
70,676	2.40	2.71		$\leq 120,000$	$\geq 2 < 5$	2.81	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales son diferentes y los números estructurales (SN) varían en un 3.69%, por lo que son similares, esto quiere decir que no importa la diferencia de los espesores de las capas, siempre y cuando se cumpla con los números estructurales, dicha distribución va a depender de la economía y el entorno.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Arévalo Zhagui (2018).

4.2.13. Estudios de ingenierías para el diseño geométrico, de pavimentos, hidráulicos, estructuras de contención, para la vía Naranjos, Guaguazhumi y Cochas de la parroquia Paccha del cantón Cuenca de la provincia del Azuay en una extensión aproximada de 10.0 km

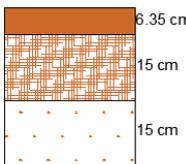
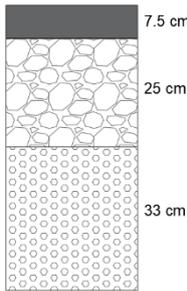
Tabla 4.14. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía Cochas y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
236,914	1.55	3.30		$> 120,000$ $\leq 300,000$	< 2	3.88	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar que los números estructurales varían en un 17.58%, en donde la diferencia del mismo proviene del coeficiente de drenaje del estudio que tiene el valor de 1. Sin embargo, el estudio plantea diferentes materiales, espesores de las capas granulares (bases tratadas) y un mejoramiento de la subrasante, esto con el fin de reducir el volumen de capas inferiores y ahorrar costos.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Titaniumroad Servicios de Ingeniería (s.f.).

4.2.14. Estudios de ingenierías para el diseño geométrico, de pavimentos, hidráulicos, estructuras de contención, para la vía Naranjos, Guaguazhumi y Cochas de la parroquia Paccha del cantón Cuenca de la provincia del Azuay en una extensión aproximada de 10.0 km

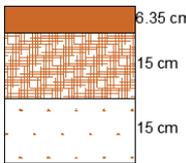
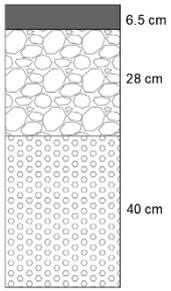
Tabla 4.15. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la vía Naranjos y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
346,620	2.80	3.05		$> 300,000$ $\leq 600,000$	$\geq 2 < 5$	3.66	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar que los números estructurales varían en un 20%, en donde la diferencia del mismo proviene del coeficiente de drenaje del estudio que tiene el valor de 1. Sin embargo, el estudio plantea diferentes materiales, espesores de las capas granulares (bases tratadas) y un mejoramiento de la subrasante, esto con el fin de reducir el volumen de capas inferiores y ahorrar costos.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Titaniumroad Servicios de Ingeniería (s.f.).

4.2.15. Consultoría de estudios geométricos para el mejoramiento vial de 12.5 km para la parroquia Baños, cantón Cuenca, provincia del Azuay”

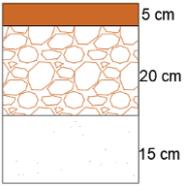
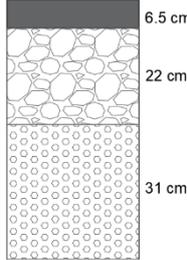
Tabla 4.16. Comparación entre los números estructurales del pavimento de la Zona 5(calle Ucholoma – Señor del Cautivo) y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
238,585	1.90	3.15		$> 120,000$ $\leq 300,000$	< 2	3.88	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar que los números estructurales varían en un 23.17%, en donde la diferencia del mismo proviene del coeficiente de drenaje del estudio que tiene el valor de 1. Sin embargo, el estudio plantea diferentes materiales, espesores de las capas granulares (bases tratadas) y un mejoramiento de la subrasante, esto con el fin de reducir el volumen de capas inferiores y ahorrar costos.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Titaniumroad Servicios de Ingeniería (s.f.).

4.2.16. Estudios de consultoría para la construcción y/o rehabilitación y mejoramiento de las calles aceras y bordillos de diferentes vías de la parroquia San Joaquín cantón Cuenca - Provincia del Azuay

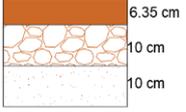
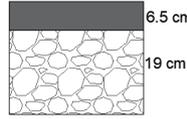
Tabla 4.17. Comparación de los números estructurales de las vías de la parroquia San Joaquín cantón Cuenca y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
247,024.21	4.84	2.55		$> 120,000$ $\leq 300,000$	$\geq 2 < 5$	3.27	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar que el número estructural del catálogo varía en un 28.24% con el valor del estudio, por lo que se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 80% y la serviciabilidad final es de 2. Es preciso mencionar que en el estudio la estructura de pavimento tiene capas de diferentes materiales con la finalidad de reducir el volumen de las capas inferiores y ahorrar costos.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Titaniumroad Servicios de Ingeniería (s.f.).

4.2.17. Estudio y diseños definitivos de ingeniería para el mejoramiento vial del tramo Guachún – entrada a Cristo Rey – quebrada El Chocar de la parroquia San Cristóbal en una extensión aproximada de 2.3 km

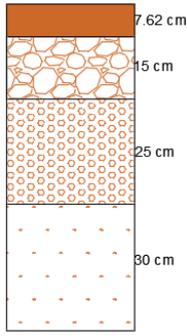
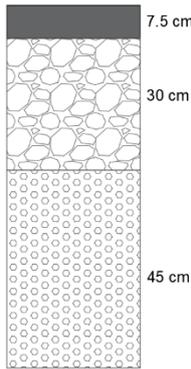
Tabla 4.18. Comparación de los números estructurales del tramo Guachun – entrada a Cristo Rey – quebrada El Chocar de la parroquia San Cristóbal y el catálogo de la tabla 3.7

Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
283,247	17	2.12		$> 120,000$ $\leq 300,000$	$\geq 15 < 25$	1.97	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar que el número estructural estudio varía en un 7.08% con el valor del catálogo, por lo que se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 80% y la serviciabilidad final es de 2. Es preciso mencionar que en el estudio la estructura de pavimento tiene capas de diferentes materiales con la finalidad de reducir el volumen de las capas inferiores y ahorrar costos.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Titaniumroad Servicios de Ingeniería (s.f.).

4.2.18. Diseño de pavimento flexible para la vía: Panamericana Norte – Zhiquir – Bomba de Agua, parroquia Llaeo

Tabla 4.19. Comparación de los números estructurales de la vía Panamericana Norte – Zhiquir – Bomba de Agua de la parroquia Llaeo y el catálogo de la tabla 3.7

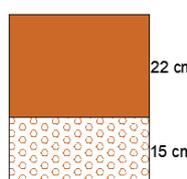
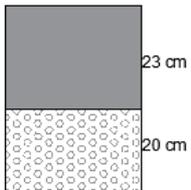
Estudio				Catálogo			
ESAL's	CBR %	SN	Estructura	ESAL's	CBR %	SN	Estructura
400,000	1.04	3.97		$> 300,000$ $\leq 600,000$	< 2	4.32	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar que el número estructural del catálogo varía en un 8.82% con el valor del estudio, por lo que se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 80% y la serviciabilidad final es de 2.2. Es preciso mencionar que en el estudio la estructura de pavimento tiene capas de diferentes materiales con la finalidad de reducir el volumen de las capas inferiores y ahorrar costos.</p>							

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Titaniumroad Servicios de Ingeniería (s.f.).

4.3. Revisión de los estudios de pavimentos rígidos

4.3.1. Diseños definitivos para el mejoramiento de la vía Centro Parroquial, Santa Catalina, el Despacho, Santa Sofía y Guncay de la parroquia de El Valle

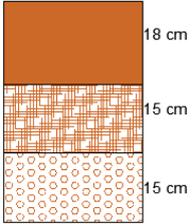
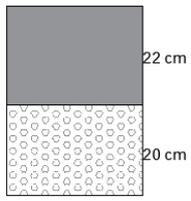
Tabla 4.20. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la vía Centro Parroquial, Santa Catalina, el Despacho, Santa Sofía y Guncay y el catálogo de secciones estructurales

Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
2'269,916	5		$> 1'500,000$ $\leq 3'000,000$	$\geq 5 < 10$	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que los espesores de las capas estructurales no tienen diferencias considerables, sin embargo, el espesor de la capa de rodadura del catálogo varía en un 4.35% con respecto al estudio, por lo que después de realizar el análisis de la tesis se concluyó que las pequeñas diferencias en los espesores se deben al parámetro por uso de pasadores con el valor de 3.6</p>					

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Arévalo Moscoso y Prieto Centeno (2018).

4.3.2. Diseño de pavimento rígido para reposición de calzada: calle Enrique Guapizaca y Martín Gárate

Tabla 4.21. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la vía Centro Parroquial, Santa Catalina, el Despacho, Santa Sofía y Guncay y el catálogo de secciones estructurales

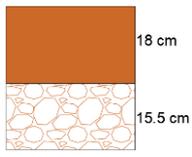
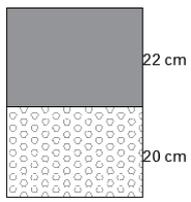
Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
650000	2.29		$> 300,000$ $\leq 750,000$	$\geq 2 < 5$	

Nota: Si bien el espesor de la capa de rodadura tiene una diferencia de 4cm, es decir varía en un 18.18% con respecto al estudio, esto se debe a que el diseño propuesto por el GAD Municipal presenta una capa extra de base cemento de 15 cm lo cual permite reducir el espesor de la losa de hormigón. Cabe recalcar que el espesor calculado inicialmente por la institución es de 7.98 pulgadas o 20 cm.

Fuente: Elaboración propia, adaptada de la Dirección de Fiscalización, GAD Municipal del cantón Cuenca (2018).

4.3.3. Diseños definitivos de las calles Santo de la Soga, Juego de la Pallca y Juego de Ajedrez, incluye diseño geométrico, de pavimentos y muros de contención

Tabla 4.22. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de las calles Salto de la Soga, Juego de la Pallca y Juego de Ajedrez y el catálogo de secciones estructurales

Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
1'700,913	3.40		$> 1'500,000$ $\leq 3'000,000$	$\geq 2 < 5$	

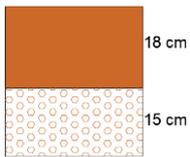
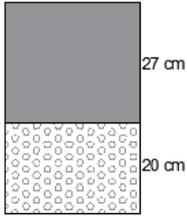
Nota: Se puede observar en las gráficas que en el estudio se diseñó con una capa de base granular, mientras que en el catálogo se utilizó una capa de subbase granular, debido a esto el espesor de la capa de rodadura varía en un 18.18% con respecto al estudio.

También se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia se debe a que la desviación normal integral del estudio es de 0.38, el nivel de confiabilidad tiene un valor del 65%, la serviciabilidad final es de 2, el coeficiente de drenaje es de 0.60 y la resistencia a la compresión simple del concreto es de 350 kg/cm².

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Cedillo Vargas (2022).

4.3.4. Diseño de pavimentos y análisis económico de la calle Paseo Tres de Noviembre y de la calle Colombia, de la ciudad de Cuenca

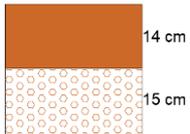
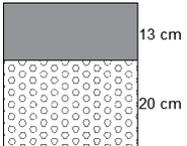
Tabla 4.23. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Paseo Tres de Noviembre de la ciudad de Cuenca y el catálogo de secciones estructurales

Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
3'432,480	1.7		$> 3'000,000$ $\leq 7'500,000$	< 2	

Nota: Se puede observar en las gráficas que el espesor de la capa de rodadura del catálogo varía en un 33.33% con respecto al estudio, por lo que los espesores de las capas granulares son diferentes, debido a esto se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia de los espesores se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 90%, la serviciabilidad final es de 2, el coeficiente de drenaje es de 1.1 y el coeficiente de transmisión de carga es de 3.

Fuente: Elaboración propia, adaptada de Cárdenas Carpio (2014).

Tabla 4.24. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Colombia de la ciudad de Cuenca y el catálogo de secciones estructurales

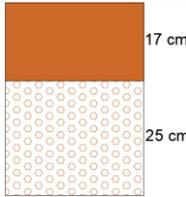
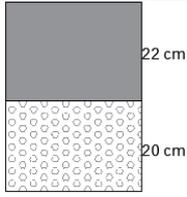
Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
1'221,196	8		$> 750,000$ $\leq 1'500,000$	$\geq 5 < 10$	

Nota: Se observa que el espesor de la capa de rodadura varía en un 7.14% con respecto al catálogo, por lo que los espesores de las capas granulares son diferentes, debido a esto se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia de los espesores se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 90%, la serviciabilidad final es de 2, el coeficiente de drenaje es de 1.1 y el coeficiente de transmisión de carga es de 3.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Cárdenas Carpio (2014).

4.3.5. Estudios geométricos, diseños de pavimentos y levantamientos topográficos de varias calles de la ciudad de Cuenca dentro del programa de pavimentación barrio para mejor vivir

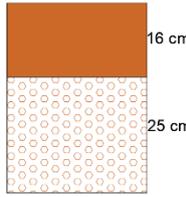
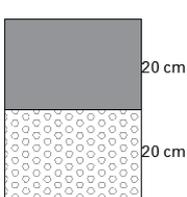
Tabla 4.25. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Alfonso Cuesta Cuesta de la parroquia Bellavista y el catálogo de secciones estructurales

Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
1'370,877	4.1		> 750,000 ≤ 1'500,000	≥ 2 <5	

Nota: Se puede observar en las gráficas que el espesor de la capa de rodadura del estudio varía en un 22.73% con respecto al catálogo, por lo que los espesores de las capas granulares son diferentes, debido a esto se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia de los espesores se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 50%, la serviciabilidad final es de 2, además la subbase tiene un espesor de 25cm, lo que genera que el espesor de la capa de rodadura disminuya.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SueloTec (2020).

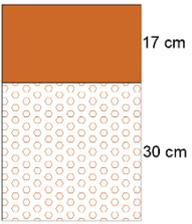
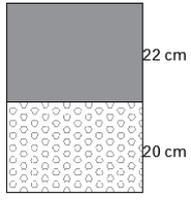
Tabla 4.26. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Rafel Aguilar de la parroquia El Batán y el catálogo de secciones estructurales

Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
1'370,877	8.5		> 750,000 ≤ 1'500,000	≥ 5 <10	

Nota: Se puede observar en las gráficas que el espesor de la capa de rodadura del estudio varía en un 20% con respecto al catálogo, por lo que los espesores de las capas granulares son diferentes, debido a esto se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia de los espesores se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 50%, la serviciabilidad final es de 2, además la subbase tiene un espesor de 25cm, lo que genera que el espesor de la capa de rodadura disminuya.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SueloTec (2020).

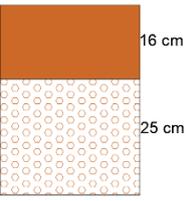
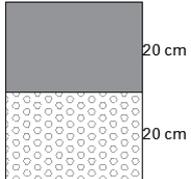
Tabla 4.27. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Batallón Numancia de la parroquia El Vecino y el catálogo de secciones estructurales

Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
1'370,877	2.9		$> 750,000$ $\leq 1'500,000$	$\geq 2 < 5$	

Nota: Se puede observar en las gráficas que el espesor de la capa de rodadura del estudio varía en un 22.73% con respecto al catálogo, por lo que los espesores de las capas granulares son diferentes, debido a esto se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia de los espesores se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 50%, la serviciabilidad final es de 2, además la subbase tiene un espesor de 30cm, lo que genera que el espesor de la capa de rodadura disminuya.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SueloTec (2020).

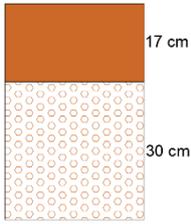
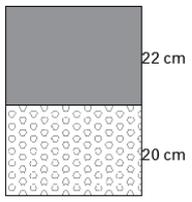
Tabla 4.28. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Fernando Pazán de la parroquia Machángara y el catálogo de secciones estructurales

Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
1'370,877	6.2		$> 750,000$ $\leq 1'500,000$	$\geq 5 < 10$	

Nota: Se puede observar en las gráficas que el espesor de la capa de rodadura del estudio varía en un 20% con respecto al catálogo, por lo que los espesores de las capas granulares son diferentes, debido a esto se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia de los espesores se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 50%, la serviciabilidad final es de 2, además la subbase tiene un espesor de 25cm, lo que genera que el espesor de la capa de rodadura disminuya.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SueloTec (2020).

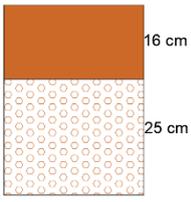
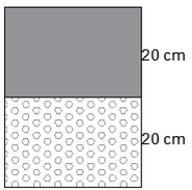
Tabla 4.29. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Retorno da a la Av. Rayoloma de la parroquia Monay y el catálogo de secciones estructurales

Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
1'370,877	3.8		$> 750,000$ $\leq 1'500,000$	$\geq 2 < 5$	

Nota: Se puede observar en las gráficas que el espesor de la capa de rodadura del estudio varía en un 22.73% con respecto al catálogo, por lo que los espesores de las capas granulares son diferentes, debido a esto se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia de los espesores se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 50%, la serviciabilidad final es de 2, además la subbase tiene un espesor de 30cm, lo que genera que el espesor de la capa de rodadura disminuya.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SueloTec (2020).

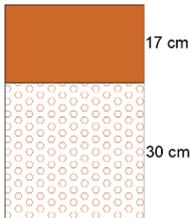
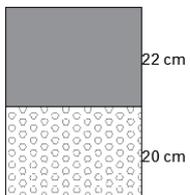
Tabla 4.30. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle De las Pomarosas de la parroquia San Sebastian y el catálogo de secciones estructurales

Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
1'370,877	5.7		$> 750,000$ $\leq 1'500,000$	$\geq 5 < 10$	

Nota: Se puede observar en las gráficas que el espesor de la capa de rodadura del estudio varía en un 20% con respecto al catálogo, por lo que los espesores de las capas granulares son diferentes, debido a esto se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia de los espesores se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 50%, la serviciabilidad final es de 2, además la subbase tiene un espesor de 25cm, lo que genera que el espesor de la capa de rodadura disminuya.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SueloTec (2020).

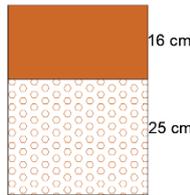
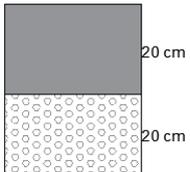
Tabla 4.31. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Puna de la parroquia Sucre y el catálogo de secciones estructurales

Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
1'370,877	3		$> 750,000$ $\leq 1'500,000$	$\geq 2 < 5$	

Nota: Se puede observar en las gráficas que el espesor de la capa de rodadura del estudio varía en un 22.73% con respecto al catálogo, por lo que los espesores de las capas granulares son diferentes, debido a esto se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia de los espesores se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 50%, la serviciabilidad final es de 2, además la subbase tiene un espesor de 30cm, lo que genera que el espesor de la capa de rodadura disminuya.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SueloTec (2020).

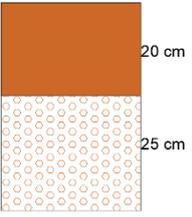
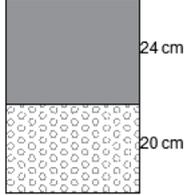
Tabla 4.32. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Río San Lorenzo de la parroquia Yanuncay y el catálogo de secciones estructurales

Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
1'370,877	7.3		$> 750,000$ $\leq 1'500,000$	$\geq 5 < 10$	

Nota: Se puede observar en las gráficas que el espesor de la capa de rodadura del estudio varía en un 20% con respecto al catálogo, por lo que los espesores de las capas granulares son diferentes, debido a esto se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia de los espesores se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 50%, la serviciabilidad final es de 2, además la subbase tiene un espesor de 25cm, lo que genera que el espesor de la capa de rodadura disminuya.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SueloTec (2020).

Tabla 4.33. Comparación entre los espesores de la estructura de pavimento de la calle Coronel Monsalve de la parroquia Hermano Miguel y el catálogo de secciones estructurales

Estudio			Catálogo		
ESAL's	CBR %	Estructura	ESAL's	CBR %	Estructura
3'678,173	5.5		$> 3'000,000$ $\leq 7'500,000$	$\geq 5 < 10$	
<p><i>Nota:</i> Se puede observar en las gráficas que el espesor de la capa de rodadura del estudio varía en un 16.67% con respecto al catálogo, por lo que los espesores de las capas granulares son diferentes, debido a esto se realizó un análisis del estudio y se concluyó que la diferencia de los espesores se debe a que el nivel de confiabilidad del estudio tiene un valor del 50%, además la subbase tiene un espesor de 25cm, lo que genera que el espesor de la capa de rodadura disminuya.</p>					

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SueloTec (2020).

4.4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante la comparación de los estudios y tesis con respecto a los catálogos de números estructurales y secciones estructurales, los cuales se calcularon mediante la aplicación de estadística y a través de porcentajes.

Tabla 4.34. Resultados de la comparación de los números estructurales entre el catálogo y los estudios para pavimentos flexibles

ESTUDIO	ESAL's	CBR %	Similitud	Peso	Peso*Similitud	Error entre catálogo y estudio
4.2.2	93.367	3.15	99,64%	6,10%	6,08%	0,36%
4.2.3	1.003.788	1.80	92,12%	5,64%	5,20%	7,88%
4.2.4	1.753.563	3.40	96,96%	5,94%	5,76%	3,04%
4.2.5.1	1.210.076	1.70	88,32%	5,41%	4,78%	11,68%
4.2.5.2	430.517	8	82,26%	5,04%	4,14%	17,74%
4.2.6	523.299	8.5	85,49%	5,24%	4,48%	14,51%
4.2.16	247.024	4.84	71,76%	4,39%	3,15%	28,24%
4.2.17	283.247	17	92,92%	5,69%	5,29%	7,08%
4.2.18	400.000	1.04	91,18%	5,58%	5,09%	8,82%
4.2.1	285.444	2.5	96,75%	5,92%	5,73%	3,25%
4.2.7	523.299	6.2	71,37%	4,37%	3,12%	28,63%
4.2.8	523.299	5.7	75,21%	4,61%	3,46%	24,79%
4.2.9	1.015.786	5	86,05%	5,27%	4,53%	13,95%
4.2.10	371.339	3.5	72,92%	4,47%	3,26%	27,08%
4.2.11	2.870.000	3.93	94,38%	5,78%	5,46%	5,62%
4.2.12	70.676	2.40	96,31%	5,90%	5,68%	3,69%
4.2.13	236.914	1.55	82,42%	5,05%	4,16%	17,58%
4.2.14	346.620	2.80	80,00%	4,90%	3,92%	20,00%
4.2.15	238.585	1.90	76,83%	4,70%	3,61%	23,17%
RESULTADOS			1632,90%	100,00%	86,90%	

Fuente: Elaboración propia (2022).

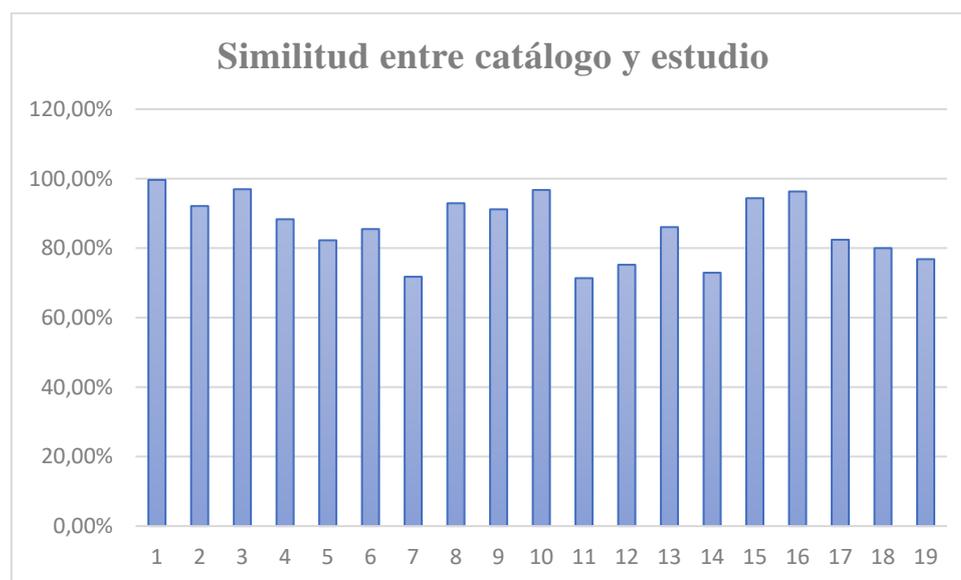


Figura 4.2. Resultados de la semejanza de los números estructurales entre el catálogo y los estudios para pavimentos flexibles

Fuente: Elaboración propia (2022).

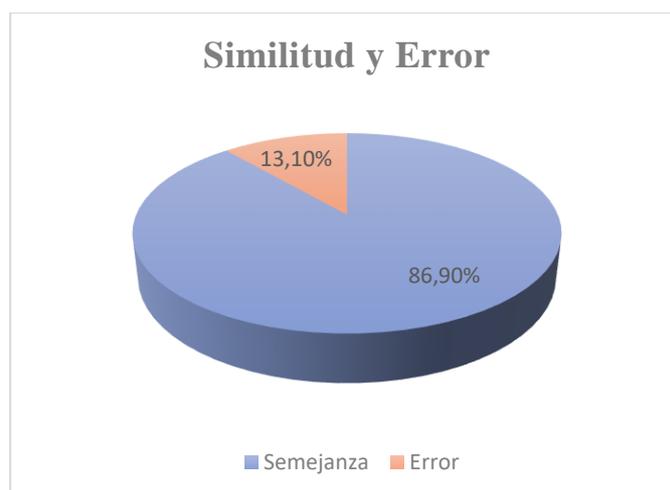


Figura 4.3. Porcentaje total de la semejanza y error de los números estructurales de los estudios con respecto al catálogo para pavimentos flexibles
Fuente: Elaboración propia (2022).

Tabla 4.35. Resultados de la comparación de los espesores de pavimento entre el catálogo y los estudios para pavimentos rígidos

ESTUDIO	ESAL's	CBR %	Similitud	Peso	Peso*Similitud	Error entre catálogo y estudio
4.3.2	650.000	2.29	81,82%	7,23%	5,92%	18,18%
4.3.4.1	3.432.480	1.7	66,67%	5,89%	3,93%	33,33%
4.3.4.2	1.221.196	8	92,86%	8,21%	7,62%	7,14%
4.3.1	2.269.916	5	95,65%	8,46%	8,09%	4,35%
4.3.3	1.700.913	3.40	81,82%	7,23%	5,92%	18,18%
4.3.5.1	3.432.480	1.7	77,27%	6,83%	5,28%	22,73%
4.3.5.2	1.221.196	8	80,00%	7,07%	5,66%	20,00%
4.3.5.3	1.370.877	4.1	77,27%	6,83%	5,28%	22,73%
4.3.5.4	1.370.877	8.5	80,00%	7,07%	5,66%	20,00%
4.3.5.5	1.370.877	2.9	77,27%	6,83%	5,28%	22,73%
4.3.5.6	1.370.877	6.2	80,00%	7,07%	5,66%	20,00%
4.3.5.7	1.370.877	3.8	77,27%	6,83%	5,28%	22,73%
4.3.5.8	1.370.877	5.7	80,00%	7,07%	5,66%	20,00%
4.3.5.9	1.370.877	3	83,33%	7,37%	6,14%	16,67%
RESULTADOS			1131,2%	100,00%	81,36%	

Fuente: Elaboración propia (2022).

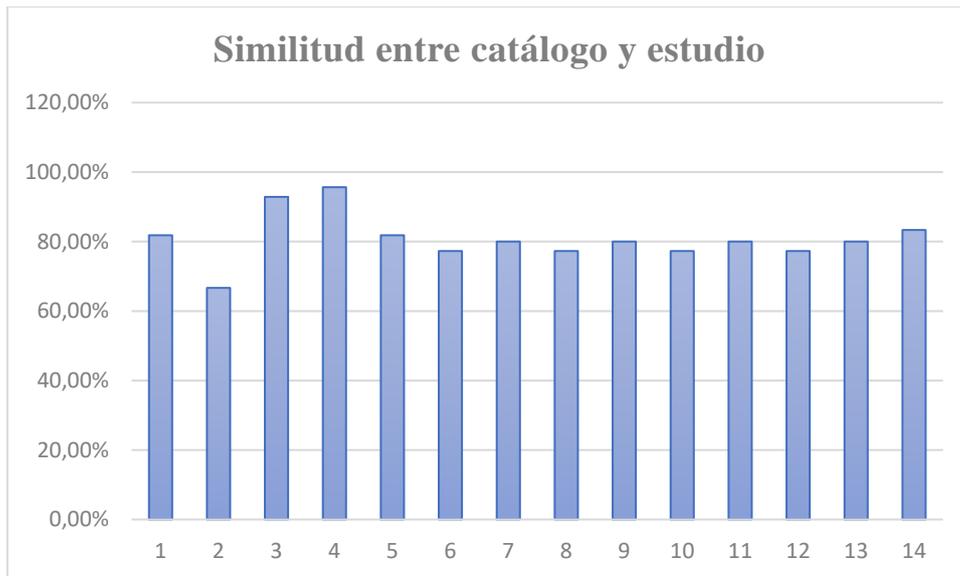


Figura 4.4. Resultados de la semejanza de los espesores de pavimento entre el catálogo y los estudios para pavimentos rígidos
Fuente: Elaboración propia (2022).

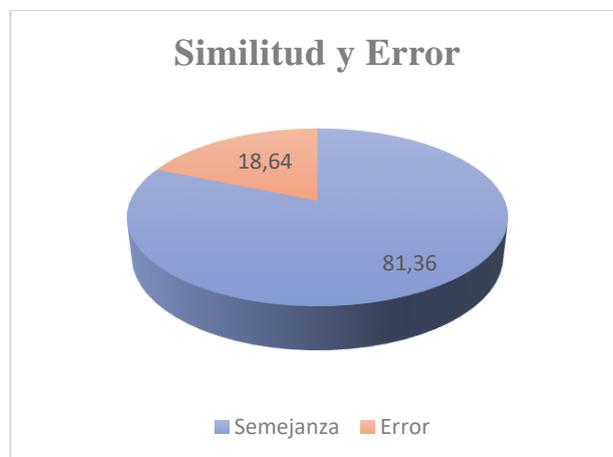


Figura 4.5. Porcentaje total de la semejanza y error de los espesores de pavimentos de los estudios con respecto al catálogo para pavimentos rígidos
Fuente: Elaboración propia (2022).

CONCLUSIONES

Se piensa que la elaboración de este catálogo será un aporte inicial para la ingeniería vial en la provincia del Azuay, debido a que a través de una sencilla metodología y sin un estudio costoso de las variables de diseño es posible obtener un abanico de soluciones estructurales para una situación específica. La empresa o entidad a cargo del diseño puede analizar dentro de la serie de soluciones que proporciona la guía, cuál es la más económica y factible para un entorno dado.

Cada sección estructural propuesta en el documento, se realizó estableciendo nueve rangos de tráfico (ESALs) y seis rangos de CBR, teniendo como guía el Manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos de Perú (2013), además, se estandarizaron los criterios de diseño de la metodología AASHTO – 93, a través de la investigación bibliográfica y cualitativa como la entrevista a especialistas del área vial.

Se tomó en cuenta los casos más desfavorables para el diseño del catálogo, es decir, se eligió en el rango de tráfico el mayor valor y en el rango de CBR el menor valor y mediante el uso de los programas Excel y Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993), se obtuvo una guía de diseño que contiene 54 secciones estructurales para pavimentos flexibles y 156 secciones estructurales para pavimentos rígidos con diferentes espesores y materiales como concreto asfáltico, concreto hidráulico, base granular y subbase granular, las cuales, se presentan por medio de cartillas que se encuentran en función del tráfico (ESALs) y el CBR de la subrasante.

Mediante la comparación del catálogo de secciones estructurales con estudios y tesis sobre diseño de pavimentos realizados en la provincia del Azuay, se pudo analizar que dichos estudios utilizan diferentes materiales para las capas granulares y la subrasante como son las bases tratadas, el mejoramiento granular y la estabilización con cal y cemento, con la finalidad de reducir costos en el proyecto.

Para pavimentos flexibles, mediante la comparación del número estructural que presentan los estudios con respecto al número estructural calculado en el documento, se obtuvo una semejanza del 86.90% y, para pavimentos rígidos, se comparó los espesores que presentan

los estudios con respecto a los espesores calculados en el catálogo, y se obtuvo una semejanza del 81.36%.

Con estos resultados se puede deducir que el catálogo desarrollado en el capítulo 3 es confiable para la comprobación de los diseños de estructuras de pavimentos; sin embargo, el documento se utilizaría solo como una guía de consulta rápida para obtener una idea general de la estructura de pavimentos según una situación específica, pero no sustituye la decisión del ingeniero responsable del proyecto.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a las entidades públicas como el GAD Municipal de Cuenca y el Gobierno Provincial del Azuay, realizar un estudio de tráfico mediante muestreos de las diferentes carreteras que conforman la red vial de la provincia del Azuay orientados a calcular el TPDA y los pesos por eje de vehículos pesados que son los que tienen una relación directa con el desgaste del pavimento, para así calcular el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas (W8.2) con una mayor precisión y establecer los rangos de tráfico (ESALs) de acuerdo al entorno.
- Para disminuir los espesores de las capas estructurales que se presentan en el catálogo con el fin de reducir los costos del proyecto se recomienda según Thenoux et al. (2002) para las subrasantes que posean un CBR menor o igual al 3% realizar un mejoramiento granular, el espesor va a depender de las propiedades del suelo. Además, un estudio publicado por Arévalo y Prieto (2018) recomiendan mejorar la capa de la subrasante cuando esta tenga una capacidad de soporte menor al 5%, sugiriendo la implementación de estabilización de la subrasante con materiales como cal y cemento. Sin embargo, el MTC (2013) establece que “se considerarán como materiales aptos para las capas de la subrasante suelos con $CBR \geq 6\%$ ” (Arévalo y Prieto, 2018, p.46).
- El catálogo propuesto puede ser utilizado para el diseño de pavimentos de carreteras de bajo volumen de tránsito o carreteras de menor importancia, las cuales tienen una baja calidad funcional y estructural, comúnmente no cumplen con los fines para los cuales fueron diseñados, estableciendo problemas para los usuarios en términos de acceso a fuentes de educación,

turismo y comercio, además, existe una gran limitación de recursos económicos para invertir en los estudios de este tipo de carretas siendo el catálogo una gran ayuda.

REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavements Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (1998). *Diseño de pavimentos (Trad. El Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón)*. Universidad Nacional de San Juan. (Trabajo original publicado en 1993).
- Alejos Saire, R. I. (2021). *Catálogo de estructuras de pavimentos básicos tratados para aportar al estudio prefactibilidad en el camino vecinal Pacobamba-Huironay-Ccerabamba-Abra Cusqueña, provincia Andahuaylas*. [Tesis de grado, Universidad San Ignacio de Loyola]. <https://repositorio.usil.edu.pe/items/31a70f34-f8a4-4a47-b95a-63dfc5c69ff9>
- Arévalo Moscoso, X. M., & Prieto Centeno, J. A. (2018). *Diseños definitivos para el mejoramiento de la vía Centro Parroquial, Santa Catalina, el Despacho, Santa Sofía y Guncay de la parroquia de El Valle*. [Tesis de maestría, Universidad de Cuenca]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30382>
- Arévalo Zhagui, L. M. (2018). *Diseño geométrico y de pavimentos de la vía “Camino a Ucholoma” de la parroquia de Baños, cantón Cuenca*. [Tesis de grado, Universidad Católica de Cuenca]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/1901>
- Auquilla Cobos, J. (2016). *Diseño geométrico horizontal y vertical con diseño de pavimento de la vía Tendales – Alpacruz, parroquia Quingeo, cantón Cuenca, provincia del Azuay*. [Tesis de grado, Universidad Católica de Cuenca]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/1896>
- Ávila Sanmartín, W. (2015). *Estudio y diseño definitivo a nivel de pavimento flexible de la vía La Unión – El Progreso – Mollepongo de la parroquia Pucara, cantón Pucara desde la abscisa 0+000 hasta la abscisa 5+043*. [Tesis de grado, Universidad Católica de Cuenca]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/1943>
- Badilla Vargas, G. (2009). *Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del índice de Regularidad Internacional (IRI)*. *Infraestructura Vial* (21 ed., Vol. 30). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5051912>.

- Beltrán Brito, J., & Torres Barrera, N. (2016). *Estudio de tráfico, diseño geométrico, diseño de pavimentos y presupuesto de la vía Parcuspamba – Cauquil, cantón Girón – provincia del Azuay (Tramo 1: Abs 0+000 hasta abs 4+000)*. [Tesis de grado, Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6153>
- Bojorque, I., Cabrera, A., & Urgilés, P. (2017). *Aplicación del diseño experimental para el análisis de pavimentos rígidos basado en el método de la PCA*. *Maskana* (8 ed., Vol. 1). <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/1975>
- Borbón Sepúlveda, E., & González Torres, D. (2012). *Estudio de rehabilitación de pavimento flexible del tramo de vía comprendido entre el hospital San Joaquín del barrio Cuba y el colegio Carlos Eduardo Vasco en la ciudad de Pereira*. [Tesis de pregrado, Universidad Libre Seccional Pereira]. Universidad Libre. <https://hdl.handle.net/10901/16953>
- Cano Becerril, J. (2006). *Catálogo de secciones de pavimento flexible para México*. [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey]. [repositorio.tec.mx. http://hdl.handle.net/11285/567644](http://hdl.handle.net/11285/567644)
- Cárdenas Carpio, P. (2014). *Diseño de pavimentos y análisis económico de la calle Paseo Tres de Noviembre y de la calle Colombia, de la ciudad de Cuenca*. [Tesis de pregrado, Universidad del Azuay]. Repositorio Institucional. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/3640>
- Castillo Villavicencio, P., & Montenegro Reinoso, D. (2018). *Diseño de la vía periurbana Las Cuadras – Capillapamba, para el cantón Chordeleg*. [Tesis de maestría, Universidad de Cuenca]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32176>
- Castro, C., & Pacsi, E. (2021). *Diseño estructural de pavimento flexible de alto tránsito para uso de Asentamiento Humano aplicando la metodología AASHTO-93*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/71299>
- Cedillo Vargas, K. (2022). *Diseños definitivos de las calles Salto de la Soga, Juego de la Pallca y Juego de Ajedrez, incluye diseño geométrico, de pavimentos y muros de contención*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/39268>
- Comunicaciones, M. d. (2003). *Normas de diseño geométrico de carreteras*. Ecuador.

- Coronado Iturbide, J. (2002). *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Secretaría de Integración Económica Centroamericana.
- Díaz, M. (2019). *Estudio de firmas de carreteras*. [Tesis de pregrado, Universidad de Sevilla]. Depósito de Investigación de la Universidad de Sevilla .
<https://hdl.handle.net/11441/94120>
- Dirección de Fiscalización GAD Municipal del cantón Cuenca. (2018). *Diseño de pavimento rígido para reposición de calzada: calle Enrique Guapizaca y Martin Garate*.
- Espinoza, L. (2018). *Análisis de alternativas en el diseño de pavimentos flexibles y rígidos por el método AASHTO-93*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30348>
- Fleites Aparicio, L. (2017). *Resistencia al deslizamiento y textura superficial en pavimentos flexibles en la carretera rural Santa Clara – Manicaragua*. [Tesis de pregrado, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas]. Repositorio Institucional UCLV.
<https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/8687>
- González Castro, E. (2020). *Evaluación del tránsito vehicular de la red carretera nacional aplicado para la actualización del catálogo de secciones estructurales de pavimentos para las carreteras de la República Mexicana*. [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás].
http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/3158
- Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción* (2 ed.). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9302>
- Higuera Sandoval, C. H. (2015). *Nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimentos* (2 ed.). Editorial UPTC.
- Kraemer Heilperno, C., & Alonso Del Val, M. (1996). *Firmes y pavimentos* (2 ed.). Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ley Orgánica de Transparencia y Acceso a la Información Pública / Acuerdo Ministerial No. 018-2016 (LOTAIP, 2016)

- Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Perú. (2013). *Manual de carreteras. Suelos, geología, geotecnia y pavimentos*.
http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/4515.pdf
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Perú. (2014). *Manual de carreteras. Diseño Geométrico*. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_3580.pdf
- Miró Recasens, R. (2006). *Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (ruido) y la seguridad*. ResearchGate.
<https://www.researchgate.net/publication/268287219>
- Molina Andrade, O. (2015). *Mejoramiento, diseño vial y de pavimento flexible de la vía Parcoloma-San Bartolo - Octavio Cordero Palacios*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Cuenca]. Repositorio Universidad Católica de Cuenca.
<https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/2019>
- Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (2 ed.). Universidad Católica de Colombia.
- Montejo Fonseca, A. (2006). *Ingeniería de pavimentos. Fundamentos, estudios básicos y diseño* (3 ed.). Universidad Católica de Colombia.
- Morales Espinoza, A., & Tapia Aguilar, V. (2021). . *Evaluación funcional y estructural del pavimento de la Avenida Paseo de los Cañaris, Cuenca Ecuador*. [Tesis de grado, Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10941>
- Peña Cabrera, P., & Cabrera Guambaña, C. (2016). *Estudio de tráfico, diseño geométrico, diseño hidrológico, drenaje, diseño de pavimento y presupuesto de la vía San Fernando - Yaguarcocha, cantón San Fernando – provincia del Azuay, longitud de 4 kilómetros*. [Tesis de grado, Universidad del Azuay].
<https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/5750>
- República del Ecuador Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones MOP - 001 - F 2002. (2002). *Especificaciones Generales para la construcción de caminos y puentes*.
- República del Ecuador Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2003). *Normas de Diseño Geométrico de Carreteras - MOP 2003*.
- República del Ecuador Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2019). *Reconstrucción durante 15 meses y mantenimiento durante 24 meses de la carretera Gualaceo - Limón*

- tramo: *Gualaceo - Plan de Milagro*. https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/01/LOTAIP_11_GUALACEO-LIMON.pdf
- Rico Rodríguez, A., Téllez Gutiérrez, R., & Garnica Anguas, P. (1998). *Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodología de diseño y tendencias*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano Del Transporte.
- Rondón Quintana, H., & Reyes Lizcano, F. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. ECOE Ediciones. .
- Sayers, M., & Karamihas, S. (1998). *The Little Book of Profiling*. University of Michigan.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes y la Dirección General de Servicios Técnicos. (2018). *Catálogo de secciones estructurales de pavimentos para las carreteras de la República Mexicana*.
https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Catalogo_Pavimentos/Catalogo.pdf
- Secretaría de Estado en los Despachos de Obras Públicas, Transporte y Vivienda. Dirección General de Carreteras de la República de Honduras. (1996). *Manual de carreteras. Diseño de pavimentos y mantenimiento de caminos*.
<https://www.tsc.gob.hn/biblioteca/index.php/manuales/646-manual-de-carreteras>
- SuelosTec. (2020). Estudios geométricos, diseños de pavimentos y levantamientos topográficos de varias calles de la ciudad de Cuenca dentro del programa de pavimentación barrio para mejor vivir
- Suica, J. (2020). *Estudio comparativo del diseño de pavimento flexible empleando el método AASHTO 93 y Mecánico- Empírico, Chorrillos 2020*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo.
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/58060>
- Thenoux, G., Halles, F., Barrera, E., & Miranda, J. C. (2002). *Guía de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito*. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile.
- Titaniumroad Servicios de Ingeniería. (s.f.). *Diseños de pavimentos flexibles*.
- Torres Maldonado, J. (2018). *Diseño de un tramo vial, obras complementarias de ingeniería y presupuesto de construcción de una carretera rural, aplicada a la vía Cauquil-*

- Parcuspamba*, perteneciente al cantón Girón (2 km). [Tesis de pregrado, Universidad del Azuay]. Repositorio Institucional. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8414>
- Universidad Mayor de San Simón. (2004). *Pavimentos*. Facultad de Ciencias y Tecnología.
- Urgilés Azuero, C., & Idrovo Pinos, C. (2018). *Diseño geométrico y de pavimento de la vía Parculoma-Yabrún, cantón Gualaceo*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Cuenca]. Repositorio Universidad Católica de Cuenca. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/8303>
- Varela, L., & Ron, S. (2020). *Geografía y clima del Ecuador*. BIOWEB. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <https://bioweb.bio/faunaweb/mammaliaweb/GeografiaClima/>

ANEXOS

Anexo A: Entrevista 1

ENTREVISTA

Entrevista por: María de los Ángeles Reinoso Maldonado y Paola Elizabeth Sanmartín Morales, egresadas de la carrera de Ingeniería Civil y Gerencia de Construcciones.

Fecha: 31 de mayo de 2022

Nombre del entrevistado: Ing. Flavio Albarracín

El pasado 31 de mayo de 2022 se entrevistó al ingeniero civil Flavio Albarracín, consultor del Gobierno Provincial del Azuay, Municipio de Cuenca y del Ministerio de Transportes y Obras Públicas del Ecuador. Dentro de los proyectos más importantes que ha colaborado se encuentran las vías de tercer y cuarto orden en la provincia del Azuay. Esta entrevista se realizó con la finalidad de obtener criterios para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos basados en la experiencia.

Preguntas

- 1. ¿Cuáles serían los rangos máximos y mínimos de ESALs para la red vial de la provincia del Azuay?**

Para las vías de tercer y cuarto orden, con un período de diseño de 5 años se ha determinado entre 60000 y 150000 ESALs.

- 2. ¿Cuáles serían los rangos máximos y mínimos de CBR para la red vial de la provincia del Azuay?**

Los rangos de CBR son muy amplios y dependen de la zona de estudio en la que se realizará el proyecto.

- 3. ¿Qué nivel de confiabilidad se utiliza por lo general para el diseño de las carreteras principales y secundarias?**

De acuerdo a los rangos que establece la Norma AASHTO 93 para las vías de tercer y cuarto orden se recomienda utilizar un nivel de confiabilidad del 80%.

- 4. ¿Cuáles son los coeficientes de drenaje óptimos para las capas inferiores?**

Los coeficientes de drenaje para las capas inferiores se pueden considerar con un valor de 1, sin embargo, para las peores condiciones se puede considerar un valor de 0.9 porque se espera que las capas granulares presenten un buen drenaje.

5. ¿Qué resistencia a la compresión del hormigón ($f'c$) se utiliza generalmente?

Se utiliza por lo general un hormigón con resistencia a la compresión de 300kg/cm².

6. ¿Qué coeficiente de transmisión de carga (J) sería el adecuado, basándose en el tipo de berma que se realiza generalmente?

Para el catálogo es recomendable tomar el coeficiente de 3.2 y 2.8 que corresponden a bermas granulares o asfálticas y de concreto hidráulico con pasadores.

7. ¿Siempre se utiliza pasadores?

Sí, siempre se debe utilizar pasadores sin importar la categoría de la vía.

8. ¿Cree usted que, a partir de un catálogo, en dónde las variables de entrada son el tráfico (ESALs) y CBR, se puede definir una estructura de pavimento?

Depende de la categoría de la vía, para carreteras de tercer y cuarto orden se puede definir una estructura de pavimentos basándose en un catálogo, debido a que para este tipo de proyectos no se cuenta con los suficientes recursos económicos para realizar los estudios de tráfico y CBR. Por otro lado, para las carreteras de primer y segundo orden es indispensable realizar todos los estudios necesarios, por lo que el catálogo no sería una herramienta confiable.

Anexo B: Entrevista 2

ENTREVISTA

Entrevista por: María de los Ángeles Reinoso Maldonado y Paola Elizabeth Sanmartín Morales, egresadas de la carrera de Ingeniería Civil y Gerencia de Construcciones.

Fecha: 6 de mayo de 2022

Nombre del entrevistado: Ing. Rodrigo Carvallo

El pasado 6 de mayo de 2022 se entrevistó al ingeniero civil Rodrigo Carvallo, consultor del Gobierno Provincial del Azuay, Municipio de Cuenca, Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC) y Municipio de Santa Ana con una experiencia laboral de 27 años. Dentro de los proyectos más importantes que ha colaborado se encuentra: la vía a la cárcel en la ciudad de Cuenca, Av. de las Américas, vía Naranjal – Huaquillas, aeropuerto de Loja, entre otros. Esta entrevista se realizó con la finalidad de obtener criterios para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos basados en la experiencia.

Preguntas

- 1. ¿Cuáles serían los rangos máximos y mínimos de ESALs para la red vial de la provincia del Azuay?**

Estos rangos se deberían asociar con las tablas existentes del MOP 2003, además, para establecer estos rangos se puede realizar una comparación con diferentes estudios realizados en otros países.

- 2. ¿Cuáles serían los rangos máximos y mínimos de CBR para la red vial de la provincia del Azuay?**

El CBR es uno de los puntos más importante para el diseño de pavimentos, los rangos de CBR que se encuentran establecidos en los libros y Normativas son muy amplios, sin embargo, se puede realizar una comparación entre estos y desarrollar los rangos de CBR.

- 3. ¿Qué nivel de confiabilidad se utiliza por lo general para el diseño de las carreteras principales y secundarias?**

Los rangos que establece la Norma AASHTO 93 son bastante prácticos, nos da una buena aproximación de nivel de confianza y por lo tanto de desviación estándar, nos da un resultado bastante realista, el nivel de confiabilidad del 85% estaría correcto ya que

se encuentra dentro de los valores que corresponden a las vías principales y secundarias y su variación no altera considerablemente al resultado final.

4. ¿Cuáles son los coeficientes de drenaje óptimos para las capas inferiores?

Los coeficientes de drenaje para las capas inferiores se pueden considerar con un valor de 0.8, ya que no existe un cuidado para realizar las cunetas adecuadas o simplemente no existen, entonces, la cantidad de agua que ingresa lateralmente se filtra y por capilaridad asciende a la subbase y se satura.

5. ¿Qué resistencia a la compresión del hormigón ($f'c$) se utiliza generalmente?

Se utiliza por lo general un hormigón con resistencia a la compresión de 300kg/cm², debido a que nuestro clima es muy ventoso y cambia bruscamente su temperatura, si se utiliza valores más altos se tienden a trizar porque el sol es frío más no caliente, son trizaduras superficiales pero que a la larga no están bien. Con 300kg/cm² se ha logrado conseguir una buena resistencia, operativamente es fácil trabajar. Como recomendación, los ensayos deberían hacerse también a flexión, no solo a compresión.

6. ¿Qué coeficiente de transmisión de carga (J) sería el adecuado, basándose en el tipo de berma que se realiza generalmente?

La relación que existe entre bermas granulares o asfálticas y bermas de concreto es mitad y mitad, entonces para el catálogo es recomendable tomar el coeficiente de 3.2 y 2.8, entendiéndose que también llevarían pasadores que es lo más recomendable.

7. ¿Siempre se utiliza pasadores?

Es lo más recomendable utilizar pasadores para el diseño de pavimentos rígidos, sin embargo, existen vías que no los tienen.

8. ¿Cree usted que, a partir de un catálogo, en dónde las variables de entrada son el tráfico (ESALs) y CBR, se puede definir una estructura de pavimento?

El CBR es fundamental, el tráfico es necesario más no fundamental, pero al hacer una tabla o hacer un manual bastante más real de lo que se maneja a nivel de especificaciones MTOP o tablas del MTOP, sí podría ser un aporte bastante interesante. La validación que uno considera para extrapolar el tráfico en función de los datos obtenidos del control de tráfico debería ser mucho más estudiado, no solo a nivel de

combustibles o tipo de vía, si no que se debería analizar información de tipo social, económica y de necesidades.

Anexo C: Entrevista 3

ENTREVISTA

Entrevista por: María de los Ángeles Reinoso Maldonado y Paola Elizabeth Sanmartín Morales, egresadas de la carrera de Ingeniería Civil y Gerencia de Construcciones.

Fecha: 7 de junio de 2022

Nombre del entrevistado: Ing. Carlos Orellana

El pasado 7 de mayo de 2022 se entrevistó al ingeniero civil Carlos Orellana, docente de la Universidad del Azuay y técnico del departamento de Obras Públicas del Municipio de Cuenca. Dentro de los proyectos más importantes que ha colaborado se encuentran la vía Iglesia – Equiplast, vía Sinincay – Pampa de Rosas, vías en la parroquia Baños y el mantenimiento de varias vías de lastre en la ciudad de Cuenca. Esta entrevista se realizó con la finalidad de obtener criterios para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos basados en la experiencia.

Preguntas

- 1. ¿Cuáles serían los rangos máximos y mínimos de ESALs para la red vial de la provincia del Azuay?**

Es conveniente realizar la investigación de estos rangos en bibliografía nacional e internacional y en estudios viales que se han elaborado dentro de la provincia del Azuay.

- 2. ¿Cuáles serían los rangos máximos y mínimos de CBR para la red vial de la provincia del Azuay?**

Los rangos de CBR de acuerdo al MTC (2013) y Assis. A. (1988) pueden ser: < 2%, 2 – 5%, 5 – 10%, 10 – 15%, 15 - 25% y > 25%

- 3. ¿Qué nivel de confiabilidad se utiliza por lo general para el diseño de las carreteras principales y secundarias?**

De acuerdo a los rangos que establece la Norma AASHTO 93 se recomienda utilizar un nivel de confiabilidad del 85%.

4. ¿Cuáles son los coeficientes de drenaje óptimos para las capas inferiores?

Los coeficientes de drenaje para las capas inferiores se pueden considerar con un valor de 0.9.

5. ¿Qué resistencia a la compresión del hormigón ($f'c$) se utiliza generalmente?

Se utiliza por lo general un hormigón con resistencia a la compresión de 300kg/cm².

6. ¿Qué coeficiente de transmisión de carga (J) sería el adecuado, basándose en el tipo de berma que se realiza generalmente?

Para el catálogo es recomendable tomar el coeficiente de 3.2 y 2.8 que corresponden a bermas granulares o asfálticas y de concreto hidráulico, teniendo en cuenta el número de ESALs para establecer si se debe construir con pasadores o no.

7. ¿Siempre se utiliza pasadores?

Depende del número de ESALs que tenga la vía.

8. ¿Cree usted que, a partir de un catálogo, en dónde las variables de entrada son el tráfico (ESALs) y CBR, se puede definir una estructura de pavimento?

Sí se puede.