



EDITORIAL RUNAIKI

DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS: FUNDAMENTOS TÉCNICOS Y HERRAMIENTAS INTELIGENTES. TOMO I

ISBN: 978-9942-571-09-0

AUTORES:

**Luis Alfonso Moreno Ponce
Lucy Elizabeth Solorzano Villegas
Carlos José Zavala Vásquez
José Fabián Torres Parrales
Martha Johana Álvarez Álvarez
George Alfredo Cañarte Baque
Ronald Pastor Delgado Alvia
Julio Johnny Regalado Jalca**



Diseño de Pavimentos para Carreteras: Fundamentos Técnicos y Herramientas Inteligentes

Tomo I

Autores.

Luis Alfonso Moreno Ponce

Lucy Elizabeth Solorzano Villegas

Carlos José Zavala Vásquez

José Fabián Torres Parrales

Martha Johana Álvarez Álvarez

George Alfredo Cañarte Baque

Ronald Pastor Delgado Alvia

Julio Johnny Regalado Jalca





Primera Edición 2025

ISBN: 978-9942-571-09-0

2025, RUNAIKI Editora-Editorial Internacional. España.

<https://runaiki.es/index.php/runaiki>

Consejo Editorial:

Dra. Mayra Díaz Martínez, PhD.

RUNAIKI Editora-Editorial Internacional. España.

Hecho en Ecuador

Este texto ha sido sometido a un riguroso proceso de evaluación por pares externos.

Advertencia: Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción, registro o transmisión parcial o total de esta obra por cualquier sistema de recuperación de información existente o futuro, sin el permiso previo y por escrito del titular de los derechos correspondientes.

Escanea el QR para acceder al libro



ISBN: 978-9942-571-09-0



AUTORES:

Ing. Luis Alfonso Moreno Ponce, Mg.

Institución: Universidad Estatal del Sur de Manabí, Facultad de Ciencias Técnicas,
Carrera de Ingeniería Civil.

Autor del **Capítulo I: Fundamentos del Diseño de Pavimentos**

Correo: luis.moreno@unesum.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9026-1009>

Ing. Lucy Elizabeth Solórzano Villegas, Mg.

Institución: Universidad Estatal del Sur de Manabí, Facultad de Ciencias Técnicas,
Carrera de Ingeniería Civil.

Capítulo: Autora del **Capítulo II: Tránsito y Cargas Actuales**

Correo: lucy.solorzano@unesum.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9903-5304>

Ing. Carlos José Zavala Vásquez, Mg.

Institución: Universidad Estatal del Sur de Manabí, Facultad de Ciencias Técnicas,
Carrera de Ingeniería Civil.

Autor del **Capítulo III: Caracterización de Subrasantes y Procesamiento del CBR**

Correo: carlos.zavala@unesum.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6265-2651>

Ing. José Fabián Torres Parrales, Mg.

Institución: Universidad Estatal del Sur de Manabí, Facultad de Ciencias Técnicas,
Carrera de Ingeniería Civil.

Autor del **Capítulo IV: Materiales y Mezclas para Pavimentos Flexibles**

Correo: jose.torres@unesum.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2188-2625>

Ing. Martha Johnana Álvarez Álvarez, Mg.

Institución: Universidad Estatal del Sur de Manabí, Facultad de Ciencias Técnicas,
Carrera de Ingeniería Civil.

Autora del **Capítulo V: Diseño de Pavimentos Flexibles**

Correo: martha.alvarez@unesum.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9879-0367>

Arq. George Alfredo Cañarte Baque, Mg.

Institución: Universidad Estatal del Sur de Manabí, Facultad de Ciencias Técnicas,
Carrera de Ingeniería Civil.

Autor del **Capítulo VI: Análisis de Ciclo de Vida y Sostenibilidad en el Diseño de Pavimentos**

Correo: george.canarte@unesum.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3376-2557>

Ing. Ronald Pastor Delgado Alvia, Mg.

Institución: Universidad Estatal del Sur de Manabí, Facultad de Ciencias Técnicas,
Carrera de Ingeniería Civil.

Autor del **Capítulo VII: Fundamentos de Inteligencia Artificial Aplicada al Diseño**

Correo: ronald.delgado@unesum.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-7542>

Ing. Julio Johnny Regalado Jalca, Mg.

Institución: Universidad Estatal del Sur de Manabí, Facultad de Ciencias Técnicas,
Carrera de Ingeniería Civil.

Autor del **Capítulo VIII: Diseño de Pavimentos Asistido por Python y Google Colab**

Correo: julio.regalado@unesum.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1669-8522>

Resumen

Este libro técnico ofrece un enfoque integral para el diseño estructural de pavimentos flexibles, articulando fundamentos teóricos con herramientas computacionales que responden a las necesidades de la práctica profesional contemporánea. El desarrollo se sustenta en la metodología AASHTO 1993, adaptada a la normativa ecuatoriana NEVI-12, incorporando parámetros esenciales como los ejes equivalentes (ESALs), el índice CBR, el módulo resiliente (Mr) y el número estructural (SN). A lo largo de una estructura progresiva, se combinan ejemplos manuales con implementaciones automatizadas en Python, integrando lógica estructural, análisis de datos y procesos iterativos de ajuste. El contenido está concebido tanto para contextos académicos como para proyectos reales de infraestructura vial, ofreciendo una guía clara y aplicable para ingenieros, docentes y estudiantes. Se incluyen algoritmos que permiten evaluar múltiples combinaciones de espesores, verificar su cumplimiento normativo conforme a la NEVI-12 y comparar alternativas estructurales con apoyo técnico y gráfico. Cada capítulo ha sido desarrollado con rigurosidad científica y un enfoque pedagógico, lo que facilita la comprensión de los conceptos fundamentales y su aplicación en escenarios complejos. Además, se destaca el uso de inteligencia artificial como recurso complementario para optimizar el proceso de diseño y fortalecer la trazabilidad de los resultados. Este primer tomo constituye una herramienta esencial para el diseño de pavimentos en América Latina, aportando claridad metodológica, respaldo normativo y funcionalidad práctica. Su lectura brinda una comprensión profunda de los criterios que sustentan un diseño estructural eficiente, orientado a la sostenibilidad, la durabilidad y la calidad de las soluciones viales.

Palabras clave: pavimentos flexibles, diseño estructural, AASHTO 1993, NEVI-12, inteligencia artificial.

Abstract

This technical book provides a comprehensive approach to the structural design of flexible pavements, combining theoretical foundations with computational tools that meet the demands of modern professional practice. The work is based on the AASHTO 1993 methodology, adapted to the Ecuadorian NEVI-12 standard, and incorporates key parameters such as equivalent single axle loads (ESALs), the California Bearing Ratio (CBR), the resilient modulus (M_r), and the structural number (SN). Through a progressive structure, it integrates manual design procedures with automated Python implementations, encompassing structural logic, data analysis, and iterative adjustment processes. The content is intended for both academic contexts and real-world road infrastructure projects, offering clear and practical guidance for engineers, instructors, and students. Algorithms are included to evaluate multiple layer thickness combinations, verify compliance with NEVI-12 requirements, and compare structural alternatives with technical and graphical support. Each chapter has been developed with scientific rigour and a pedagogical focus, facilitating the understanding of fundamental concepts and their application in complex scenarios. Furthermore, artificial intelligence is highlighted as a complementary resource to optimise the design process and enhance the traceability of results. This first volume constitutes an essential tool for pavement design in Latin America, providing methodological clarity, normative support, and practical functionality. Its reading enables a deep understanding of the criteria underpinning efficient structural design, oriented towards sustainability, durability, and the quality of road solutions.

Keywords: flexible pavements, structural design, AASHTO 1993, NEVI-12, artificial intelligence.

ÍNDICE

RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
PRÓLOGO.....	XV
1 CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	1
1.1 FUNCIONES, CLASIFICACIÓN Y PROPÓSITO ESTRUCTURAL	1
1.1.1 Clasificación funcional del pavimento.....	2
1.1.2 Propósito estructural de cada capa.....	2
1.1.3 Interacción entre capas en el sistema estructural.....	3
1.1.4 Relación normativa entre clasificación, función y propósito estructural	4
1.2 COMPORTAMIENTO MECÁNICO ANTE SOLICITACIONES CÍCLICAS	4
1.2.1 Fatiga y envejecimiento de los materiales paviméntales	4
1.2.2 Mecanismos de deterioro en pavimentos flexibles.....	5
1.2.3 Mecanismos de deterioro en pavimentos rígidos.....	6
1.2.4 Factores que influyen en la resistencia a fatiga	7
1.2.5 Aplicación en diseño mecanicista-empírico y auditorías	7
1.3 TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL: PAVIMENTOS FLEXIBLES, RÍGIDOS Y COMPUESTOS.....	7
1.3.1 Pavimentos flexibles	7
1.3.2 Pavimentos rígidos	8
1.3.3 Pavimentos compuestos (mixtos)	9
1.3.4 Selección estructural y análisis técnico-económico	9
1.4 PRINCIPALES MECANISMOS DE FALLA	10
1.4.1 Fisuración por fatiga (alligator cracking).....	10
1.4.2 Deformación plástica (rutting)	11
1.4.3 Desgaste superficial (ravelling).....	12
1.4.4 Fisuración y faulting en pavimentos rígidos.....	12
1.4.5 Mecanismos térmicos, reflexivos y microfisuración	13
1.5 NORMATIVAS TÉCNICAS INTERNACIONALES (AASHTO, ICAO, FAA).....	13
1.5.1 AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.....	13
1.5.2 FAA – Airport Pavement Design (AC 150/5320-6)	14
1.5.3 ICAO Anexo 14 – Pavimentación de Aeródromos	14
1.5.4 Integración en NEVI-12 y especificaciones ecuatorianas	15
1.5.5 Comparación normativa y aplicación en auditorías	16
1.6 INTRODUCCIÓN A METODOLOGÍAS EMPÍRICAS Y MECANICISTAS	17
1.6.1 Materiales y calidad de la mezcla	17
1.6.2 Tráfico y carga vehicular	17
1.6.3 Condiciones climáticas y ambientales	18
1.6.4 Calidad de construcción y supervisión	19

1.6.5	Estructura y espesor adecuados del pavimento	19
1.7	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DURABILIDAD DEL PAVIMENTO	20
1.7.1	Enfoque empírico tradicional	20
1.7.2	Enfoque mecanicista	20
1.7.3	Metodología mecanicista-empírica (MEPDG)	21
1.7.4	Aplicación en Ecuador y Latinoamérica	23
2	CAPÍTULO 2. TRÁNSITO Y CARGAS ACTUANTES.....	24
2.1	CLASIFICACIÓN DEL TRÁNSITO VEHICULAR POR EJES	24
2.1.1	Definición y tipos de ejes vehiculares	24
2.1.2	Relevancia para el diseño estructural del pavimento	24
2.1.3	Aplicación en carreteras rurales y urbanas	26
2.2	CÁLCULO DEL TRÁNSITO DE DISEÑO Y CRECIMIENTO PROYECTADO	26
2.2.1	Tránsito de diseño y conceptos	26
2.2.2	Factores de direccionalidad y de carril.....	26
2.2.3	Proyección del tránsito con tasa de crecimiento	27
2.2.4	Importancia para el diseño estructural	27
2.2.5	Factores equivalentes de carga (FCE)	28
2.3	EVALUACIÓN DE SOLICITACIONES ACUMULADAS.....	30
2.3.1	Conversión de tránsito a ciclos de carga.....	30
2.3.2	Evaluación estructural mediante deflexiones	30
2.3.3	Ejemplo de evaluación de solicitudes acumuladas	30
2.3.4	Integración con diseño y mantenimiento	31
2.4	EFFECTOS REPETITIVOS: FATIGA Y DEFORMACIÓN PERMANENTE	31
2.4.1	Mecanismos principales de daño	31
2.4.2	Fatiga: cálculo de vida útil por S-N	32
2.4.3	Deformación permanente: análisis de rutting	32
2.4.4	Interrelación entre fatiga y rutting	33
2.4.5	Control y monitoreo para conservación	33
2.5	CONSIDERACIONES ESPECIALES EN VÍAS URBANAS Y RURALES	34
2.5.1	Tipología y variabilidad del tránsito según entorno.....	34
2.5.2	Influencia de la geometría y del entorno urbano.....	35
2.5.3	Ajustes en el cálculo de ESALs y factores de diseño	35
2.5.4	Tipología de fallas predominantes.....	36
2.5.5	Estrategias de diseño y mantenimiento diferenciadas	37
2.6	DEFINICIÓN Y RELEVANCIA DEL CARRIL DE DISEÑO	38
2.6.1	Factores de distribución del tránsito por carril	38
2.6.2	Procedimiento para seleccionar el carril de diseño	39
2.6.3	Ejemplo aplicado de selección del carril de diseño.....	40
2.6.4	Implicaciones para diseño y mantenimiento.....	40
3	CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE SUBRASANTES Y PROCESAMIENTO DEL CBR ...	42

3.1	ROL ESTRUCTURAL DE LA SUBRASANTE Y PARÁMETROS RESISTENTES	42
3.1.1	<i>Función estructural de la subrasante</i>	42
3.1.2	<i>Parámetros resistentes de diseño</i>	43
3.1.3	<i>Influencia de humedad y condiciones ambientales</i>	44
3.1.4	<i>Clasificación de suelos para fines viales</i>	45
3.1.5	<i>Ejemplo práctico de caracterización y diseño inicial</i>	46
3.1.6	<i>Implicaciones en el diseño estructural</i>	47
3.2	MUESTREO, ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO	48
3.2.1	<i>Estrategia de muestreo en campo</i>	48
3.2.2	<i>Ensayos de campo para caracterización rápida</i>	49
3.2.3	<i>Ensayos de laboratorio para diseño estructural</i>	50
3.2.4	<i>Procesamiento e interpretación de resultados</i>	50
3.2.5	<i>Ejemplo práctico de caracterización completa</i>	51
3.3	PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DEL ÍNDICE CBR	52
3.3.1	<i>Importancia del procesamiento estadístico</i>	52
3.3.2	<i>Estadísticos básicos de los resultados de CBR</i>	53
3.3.3	<i>Determinación del CBR de diseño</i>	53
3.3.4	<i>Implicaciones en el diseño estructural</i>	55
3.4	USO DE INTERVALOS DE CONFIANZA EN INGENIERÍA VIAL.....	56
3.4.1	<i>Concepto de intervalo de confianza aplicado al CBR</i>	56
3.4.2	<i>Determinación del CBR de diseño</i>	57
3.4.3	<i>Integración en el diseño de pavimentos</i>	58
3.5	MEJORA Y ESTABILIZACIÓN DEL TERRENO	59
3.5.1	<i>Métodos de mejora temporal</i>	60
3.5.2	<i>Estabilización mecánica</i>	61
3.5.3	<i>Estabilización química</i>	61
3.5.4	<i>Control de calidad y verificación de mejora</i>	62
3.6	CORRELACIÓN CBR–K PARA SUELOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	64
3.6.1	<i>Concepto del módulo de reacción k</i>	64
3.6.2	<i>Correlaciones empíricas CBR–k</i>	65
3.6.3	<i>Clasificación de subrasante para pavimentos rígidos</i>	66
3.6.4	<i>Recomendaciones para diseño y verificación</i>	68
3.6.5	<i>Correlación CBR–Mr para pavimentos flexibles</i>	68
4	CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MEZCLAS PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES	70
4.1	PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PÉTREOS	70
4.1.1	<i>Clasificación de los agregados</i>	70
4.1.2	<i>Propiedades físicas de los agregados</i>	70
4.1.3	<i>Propiedades mecánicas y de forma</i>	71
4.1.4	<i>Adhesión y compatibilidad con ligantes</i>	72
4.1.5	<i>Requisitos normativos y selección de agregados</i>	72

4.2	TIPOS DE LIGANTES ASFÁLTICOS Y EMULSIONES	72
4.2.1	Cementos asfálticos puros (CAP)	73
4.2.2	Asfaltos modificados	74
4.2.3	Emulsiones asfálticas	74
4.2.4	Propiedades reológicas y su importancia	75
4.2.5	Selección de ligantes según condiciones de proyecto	75
4.3	ENSAYO MARSHALL: DETERMINACIÓN DEL COA	76
4.3.1	Fundamento del método Marshall	76
4.3.2	Preparación de mezclas y diseño experimental	77
4.3.3	Criterios normativos de diseño	77
4.3.4	Cálculo del Contenido Óptimo de Asfalto (COA)	78
4.4	MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	79
4.4.1	Método Hveem	80
4.4.2	Método Superpave	80
4.4.3	Diagrama de flujo del proceso de dosificación	81
4.5	CONTROL DE CALIDAD EN LABORATORIO Y OBRA	82
4.5.1	Control de calidad en laboratorio	83
4.5.2	Control de calidad en obra	83
4.5.3	Frecuencias y criterios de aceptación	84
4.5.4	Evaluación de conformidad y toma de decisiones	84
4.6	REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA Y COMPACTACIÓN	85
4.6.1	Importancia de la granulometría en mezclas asfálticas	85
4.6.2	Requisitos granulométricos según NEVI-12	86
4.6.3	Requisitos de compactación	86
4.6.4	Influencia de la compactación en la durabilidad	87
4.6.5	Ejemplo de verificación de granulometría y compactación	88
4.7	EFFECTO DEL CLIMA SOBRE EL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA	88
4.7.1	Influencia de la temperatura	88
4.7.2	Efecto de la humedad y la lluvia	89
4.7.3	Ciclos de congelación y deshielo	89
4.7.4	Radiación solar y envejecimiento del asfalto	90
4.7.5	Ejemplo práctico de impacto climático	90
5	CAPÍTULO 5. DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	92
5.1	METODOLOGÍA AASHTO 1993	92
5.1.1	Fundamento de la metodología AASHTO 1993	92
5.1.2	Parámetros de entrada	93
5.1.3	Número estructural (SN) y capas del pavimento	94
5.1.4	Ejemplo de aplicación	95
5.1.5	Análisis del efecto de las cargas acumuladas	101
5.2	DETERMINACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO Y COEFICIENTES ESTRUCTURALES	101

5.2.1	<i>Influencia del módulo resiliente.....</i>	101
5.2.2	<i>Rol de los coeficientes estructurales (a_i).....</i>	102
5.2.3	<i>Análisis comparativo de diseño</i>	103
5.3	NOMOGRAMAS AASHTO Y HERRAMIENTAS DE SOFTWARE PARA DISEÑO	104
5.3.1	<i>Uso de nomogramas AASHTO.....</i>	104
5.3.2	<i>Herramientas de software.....</i>	105
5.4	SELECCIÓN DEL ESPESOR MÍNIMO POR CATEGORÍA DE VÍA Y NIVEL DE TRÁNSITO	106
5.4.1	<i>Criterios de selección del espesor mínimo</i>	107
5.4.2	<i>Integración con el diseño estructural</i>	107
5.5	EVALUACIÓN DEL DISEÑO POR DEFLEXIÓN ADMISIBLE.....	109
5.5.1	<i>Concepto y fundamento normativo</i>	109
5.5.2	<i>Ecuaciones para estimar deflexión.....</i>	110
5.5.3	<i>Valores de deflexión admisible</i>	111
5.5.4	<i>Procedimiento de evaluación.....</i>	111
5.5.5	<i>Ejemplo de evaluación por deflexión.....</i>	112
5.6	AJUSTES CONSTRUCTIVOS Y RECOMENDACIONES DE CAMPO	113
5.6.1	<i>Tolerancias de espesor y ajustes en obra</i>	113
5.6.2	<i>Control de compactación y densidad.....</i>	114
5.6.3	<i>Drenaje y condiciones climáticas</i>	114
5.6.4	<i>Recomendaciones para tránsito de obra</i>	115
5.6.5	<i>Ajustes constructivos finales y auditoría</i>	115
6	CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y SOSTENIBILIDAD EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	117
6.1	INTRODUCCIÓN	117
6.2	ENFOQUE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (LCCA)	118
6.2.1	<i>Fundamento del análisis de ciclo de vida.....</i>	118
6.2.2	<i>Diferencia entre análisis estructural y análisis de ciclo de vida</i>	119
6.2.3	<i>Etapas del ciclo de vida de un pavimento.....</i>	119
6.2.4	<i>Representación gráfica del LCCA</i>	120
6.2.5	<i>LCCA aplicado a vías ecuatorianas</i>	121
6.2.6	<i>Integración ambiental al ciclo de vida</i>	121
6.2.7	<i>Ventajas y limitaciones del LCCA</i>	122
6.3	COSTOS EN EL CICLO DE VIDA DEL PAVIMENTO	122
6.3.1	<i>Componentes del costo de ciclo de vida</i>	123
6.3.2	<i>Herramienta financiera: Valor Presente Neto (VPN)</i>	123
6.3.3	<i>Ejemplo aplicado: vía T2.....</i>	124
6.4	EVALUACIÓN AMBIENTAL EN EL CICLO DE VIDA	127
6.4.1	<i>Fundamentos conceptuales.....</i>	127
6.4.2	<i>Fases críticas en el ciclo de vida de un pavimento.....</i>	127
6.4.3	<i>Ejemplo aplicado: vía T2, análisis ambiental comparado</i>	128

6.4.4	<i>Estrategias de mitigación</i>	130
6.5	INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD INTEGRADOS	131
6.5.1	<i>Estructura de los indicadores</i>	131
6.5.2	<i>Ejemplo comparativo de evaluación (vía T2)</i>	132
6.5.3	<i>Recomendación metodológica</i>	134
7	CAPÍTULO 7: DISEÑO DE PAVIMENTOS ASISTIDO POR PYTHON Y GOOGLE COLAB..	135
7.1	DE LOS CÁLCULOS MANUALES A LA AUTOMATIZACIÓN: INTEGRACIÓN COMPUTACIONAL	135
7.1.1	<i>Limitaciones del cálculo manual en la práctica vial</i>	135
7.1.2	<i>Ventajas de automatizar con lenguajes de programación</i>	135
7.1.3	<i>¿Por qué Python? Ventajas frente a otras herramientas</i>	136
7.1.4	<i>Google Colab como entorno de trabajo accesible</i>	137
7.1.5	<i>Flujo general del diseño estructural automatizado</i>	137
7.2	PREPARACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA Y CONDICIONES DE DISEÑO	138
7.2.1	<i>Parámetros técnicos esenciales</i>	139
7.2.2	<i>Estimación del módulo resiliente a partir de datos reales</i>	139
7.2.3	<i>Selección del tipo de vía y configuración normativa</i>	141
7.2.4	<i>Organización del flujo de datos en el script</i>	142
7.2.5	<i>Apoyo de la inteligencia artificial en la creación del script</i>	142
7.3	AJUSTE ESTRUCTURAL AUTOMATIZADO EN FUNCIÓN DE CRITERIOS NORMATIVOS	146
7.3.1	<i>Lógica del ajuste estructural y prioridades de modificación</i>	146
7.3.2	<i>Implementación del ajuste estructural en Python</i>	147
7.3.3	<i>Valor técnico del ajuste estructural automatizado</i>	148
7.4	AJUSTE ESTRUCTURAL AUTOMATIZADO BASADO EN LÓGICA ITERATIVA Y VALIDACIÓN NORMATIVA 148	
7.5	COMPARACIÓN GRÁFICA DE RESULTADOS: DISEÑO INICIAL VS. ALTERNATIVAS NORMATIVAS	152
7.5.1	<i>Código Python: Visualización comparativa</i>	153
7.6	REPRESENTACIÓN GRÁFICA E INTERPRETACIÓN COMPARATIVA	156
7.6.1	<i>Parámetros de entrada y resultados globales</i>	157
7.6.2	<i>Alternativas de diseño con menor espesor total</i>	157
7.6.3	<i>Representación gráfica de alternativas</i>	158
7.6.4	<i>Observaciones para el uso del gráfico</i>	159
7.7	REFLEXIÓN FINAL Y PROYECCIONES DEL DISEÑO AUTOMATIZADO	159
8	CAPÍTULO 8. FUNDAMENTOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA AL DISEÑO 160	
8.1	INTRODUCCIÓN A MACHINE LEARNING EN INGENIERÍA VIAL	160
8.1.1	<i>Concepto de Machine Learning en ingeniería vial</i>	160
8.1.2	<i>Integración con metodologías AASHTO y NEVI-12</i>	160
8.1.3	<i>Tipos de algoritmos aplicados en pavimentos</i>	161
8.1.4	<i>Ejemplo práctico de predicción de CBR con regresión lineal múltiple</i>	161
8.2	MODELOS DE REGRESIÓN PARA PREDICCIÓN DE IRI Y CBR	167

8.2.1	<i>Fundamentos de regresión aplicada a pavimentos</i>	167
8.2.2	<i>Modelos de regresión para predicción de IRI</i>	167
8.3	APLICACIONES DE REDES NEURONALES AL DISEÑO ESTRUCTURAL.....	171
8.3.1	<i>Arquitectura básica de una red neuronal en pavimentos</i>	172
8.3.2	<i>Integración con AASHTO 1993 y NEVI-12</i>	172
8.4	CLASIFICACIÓN AUTOMATIZADA DE TRÁNSITO MEDIANTE IA.....	175
8.4.1	<i>Concepto y fundamentos de la clasificación inteligente</i>	175
8.4.2	<i>Algoritmos y técnicas empleadas</i>	175
8.4.3	<i>Integración con normas AASHTO y NEVI-12</i>	176
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	182

PRÓLOGO

La infraestructura vial constituye uno de los pilares fundamentales para el desarrollo económico, social y territorial de los países. En este marco, el diseño estructural de pavimentos no debe limitarse únicamente a satisfacer criterios técnicos, sino que también ha de responder a exigencias normativas, sostenibilidad financiera y adaptación a condiciones geotécnicas diversas. Este primer tomo del libro “Diseño de Pavimentos para Carreteras: Fundamentos Técnicos y Herramientas Inteligentes” tiene como propósito ofrecer una guía técnica, clara y progresiva dirigida a ingenieros, docentes, investigadores y estudiantes vinculados con el ámbito de la infraestructura vial.

La obra integra rigurosamente metodologías tradicionales, como la AASHTO 1993 y la normativa ecuatoriana NEVI-12, con enfoques contemporáneos basados en inteligencia artificial, automatización de cálculos y análisis de datos obtenidos de auditorías viales. A través de ejemplos prácticos, algoritmos en Python y análisis comparativos, el lector podrá comprender no solo el cómo diseñar, sino también el porqué de cada decisión estructural. Este enfoque metodológico busca fortalecer la toma de decisiones fundamentadas en criterios técnico-normativos, adaptados a realidades locales, pero con una visión y proyección global.

La redacción ha sido cuidadosamente elaborada para ofrecer un equilibrio entre un enfoque técnico-didáctico y la profundidad que demandan los estándares académicos y profesionales. Cada capítulo aporta herramientas útiles para la toma de decisiones basada en evidencia, orientando al lector hacia un diseño más eficiente, normativo y trazable.

Este tomo constituye el resultado de años de experiencia en docencia, investigación y participación en proyectos reales de vías, lo que garantiza su aplicabilidad práctica y su relevancia en el contexto actual. Además, se proyecta como un aporte estratégico a la formación continua de profesionales comprometidos con la calidad, la seguridad y la sostenibilidad de la infraestructura vial en América Latina. Con ello, se espera que esta obra se convierta en un referente técnico indispensable en el ámbito del diseño estructural de pavimentos, promoviendo el uso responsable de la tecnología y el fortalecimiento de competencias aplicadas.

Los Autores

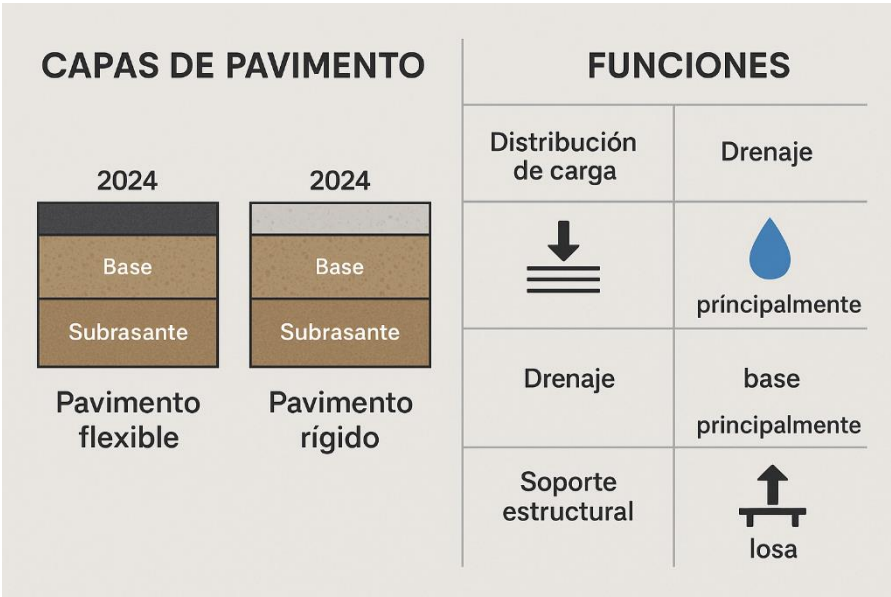
Capítulo 1. Fundamentos del Diseño de Pavimentos

1.1 Funciones, clasificación y propósito estructural

Un pavimento es una estructura artificial construida sobre la subrasante para permitir la circulación de vehículos de forma segura, continua y económica, sin importar las condiciones de humedad del terreno. Su función esencial es distribuir las cargas del tránsito hacia el suelo, reduciendo los esfuerzos que llegan a la subrasante y evitando deformaciones críticas. Además, ofrece comodidad y seguridad al usuario al garantizar regularidad superficial, resistencia al deslizamiento y capacidad de drenaje. Según la NEVI-12 (MTOP, 2012) y AASHTO-93, el diseño debe considerar cargas repetitivas, condiciones climáticas y mantenimiento proyectado para cumplir con la vida útil prevista.

En aeropuertos, las exigencias son mayores: los pavimentos deben soportar cargas concentradas de trenes de aterrizaje y ciclos de impacto repetidos, regulados por la FAA AC 150/5320-6 y la ICAO Anexo 14. Adicionalmente, la superficie debe ser impermeable y antideslizante, resistir la acción del clima y proteger la subrasante de la intemperie. La literatura especializada (Torres Vila, 2010; Wallace & Martin, 2015) enfatiza que la función del pavimento no es solo estructural, sino también funcional y de seguridad vial, siendo el primer eslabón de la durabilidad del sistema.

Figura 1-1: Capas de pavimento y sus funciones estructurales y funcionales



Nota. La figura ilustra la composición típica de un pavimento flexible y un pavimento rígido, mostrando sus capas principales (rodadura, base y subrasante) y sus funciones primordiales.

1.1.1 Clasificación funcional del pavimento

Los pavimentos se clasifican principalmente en flexibles, rígidos y compuestos. Los flexibles (asfálticos) se caracterizan por su capacidad de deformarse sin agrietarse, transmitiendo gradualmente las cargas hacia la subrasante. Están formados por capas de rodadura, base y sub-base. Los rígidos, contruidos con losas de concreto hidráulico, actúan como placas que distribuyen la carga por flexión, reduciendo la dependencia del espesor de la sub-base. Los compuestos combinan ambas tecnologías para mejorar la durabilidad y el confort.

En Ecuador, la NEVI-12 clasifica las carreteras en clases I a V según el volumen de tránsito proyectado, recomendando pavimento rígido para tráficos intensos y flexible para bajos y medios. A nivel internacional, AASHTO-93 introduce el concepto de ESALs (Equivalent Single Axle Load) para dimensionar el pavimento según el tráfico acumulado. En aeropuertos, se aplica el PCN (Pavement Classification Number) definido por FAA e ICAO, asegurando compatibilidad entre pavimento y aeronave.

Tabla 1-1: Tipos de pavimento, normas aplicables y criterios de diseño

Tipo de Pavimento	Norma de Diseño Aplicable	Criterio de Diseño Principal	Uso Recomendado
Flexible (Asfáltico)	NEVI-12 (Ecuador), AASHTO-93, AASHTO MEPDG	ESALs (Cargas equivalentes), CBR / MR del suelo	Carreteras de tráfico medio a bajo; vías urbanas
Rígido (Concreto)	NEVI-12 (Ecuador), AASHTO-93, FAA AC 150/5320-6	Módulo de reacción k, transferencia de carga en juntas	Carreteras de alto tráfico, autopistas, aeropuertos
Compuesto (Mixto)	NEVI-12 (Ecuador), AASHTO MEPDG, ICAO Anexo 14	Combinación de ESALs y PCN/ACN para compatibilidad estructural	Secciones críticas, aeropuertos con alta frecuencia de uso

Nota. La tabla resume la relación entre tipo de pavimento, normativa y aplicación funcional.

1.1.2 Propósito estructural de cada capa

El pavimento es un sistema multicapa, donde cada nivel cumple una función estructural y de protección.

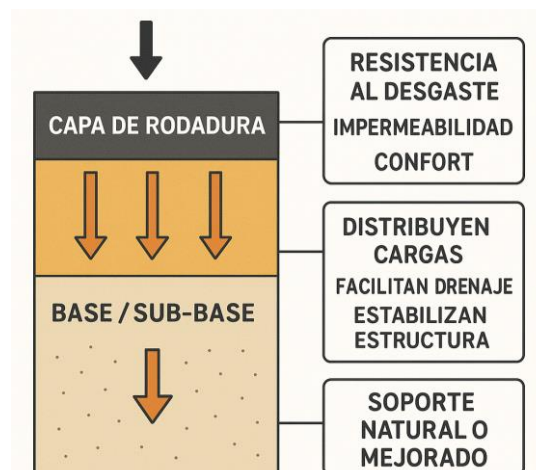
- Capa de rodadura: resistencia al desgaste, impermeabilidad y confort.
- Base y sub-base: distribuyen cargas, facilitan drenaje y estabilizan la estructura.

- Subrasante: soporte natural o mejorado, cuya capacidad portante condiciona el espesor total.

El principio estructural básico indica que las capas superiores protegen a las inferiores, reduciendo esfuerzos y evitando deformaciones.

Según AASHTO-93 y NEVI-12, el módulo resiliente del suelo (MR) y el CBR son fundamentales para dimensionar la estructura. En pavimentos rígidos, se utiliza el módulo de reacción k . Para garantizar durabilidad, la base debe tener buen drenaje y las capas deben trabajar en conjunto. La literatura (Sánchez & Torres, 2013) recomienda considerar el uso de geotextiles y capas estabilizadas en suelos débiles.

Figura 1-2: Funciones estructurales de las capas del pavimento.



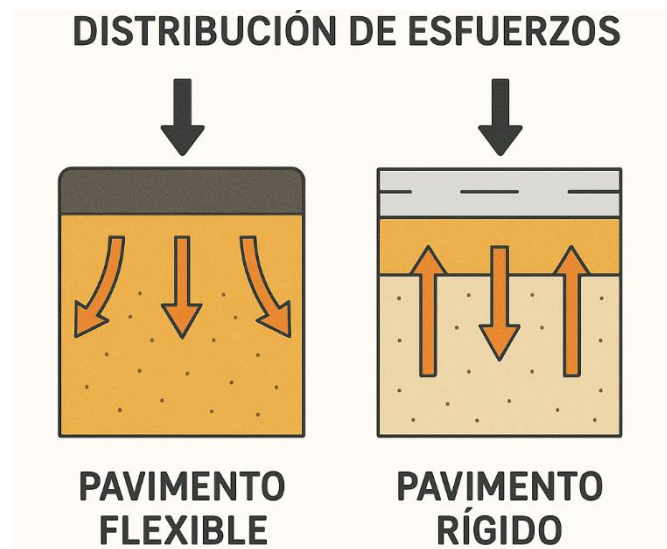
Nota: Muestra la función de cada capa: rodadura, base/sub-base y soporte natural o mejorado.

1.1.3 Interacción entre capas en el sistema estructural

El pavimento funciona como un conjunto estructural en el que la interacción entre capas es clave para su desempeño. En los flexibles, las cargas se dispersan en cono invertido, reduciendo la presión al aumentar la profundidad. En los rígidos, la losa absorbe la mayor parte del esfuerzo y lo transmite como placa al suelo. Si una capa falla (fisuras, pérdida de soporte o humedad), se compromete la durabilidad de todo el sistema.

Normativas como AASHTO MEPDG y FAA AC 150/5320-6 recomiendan asegurar adhesión entre capas, buen drenaje y evitar erosión en la base. Para aeropuertos, la correcta transferencia de carga en juntas y bordes evita fenómenos como el pumping. La modelación mecanicista permite prever el comportamiento ante cargas repetidas, reduciendo riesgos de falla prematura.

Figura 1-3: Distribución de esfuerzos en pavimentos flexibles y rígidos



Nota. El pavimento flexible dispersa cargas gradualmente, mientras que el rígido actúa como placa que transfiere esfuerzos directos.

1.1.4 Relación normativa entre clasificación, función y propósito estructural

El diseño de pavimentos debe cumplir con la NEVI-12 y estándares internacionales como AASHTO, FAA e ICAO. Estas normas articulan la relación entre tipo de pavimento, clase de tráfico, capacidad portante y vida útil proyectada. Por ejemplo, en carreteras de clase I se requieren pavimentos con mayor capacidad estructural, mientras que en vías rurales (clase V) se prioriza optimización económica.

En el ámbito aeroportuario, la ICAO exige compatibilidad pavimento-aeronave mediante el PCN/ACN, mientras que AASHTO utiliza indicadores de desempeño como PSI (Present Serviceability Index). Esta relación normativa permite auditorías viales y comparación de desempeño internacional, garantizando que los diseños sean seguros y duraderos. Tabla sugerida: matriz con tipo de pavimento, norma aplicable, criterio de diseño (ESAL, PCN, IRI) y uso recomendado.

1.2 Comportamiento mecánico ante solicitaciones cíclicas

1.2.1 Fatiga y envejecimiento de los materiales paviméntales

El pavimento está sometido a cargas cíclicas que inducen fatiga en los materiales constitutivos, fenómeno caracterizado por la formación y propagación progresiva de fisuras bajo esfuerzos repetidos menores que la resistencia estática. En mezclas asfálticas, la fatiga se traduce en grietas en piel de cocodrilo, mientras que en hormigón hidráulico aparece como fisuración por

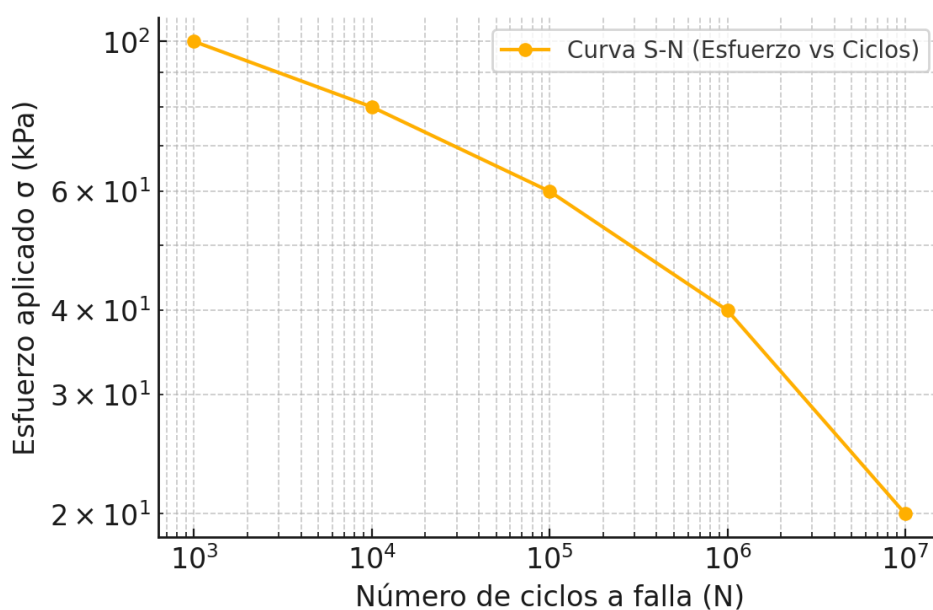
flexotracción en la base de la losa. Según NEVI-12 y AASHTO-93, el diseño debe garantizar que el número de repeticiones de carga esperado no supere la vida a fatiga de los materiales, determinada mediante ensayos de laboratorio como Beam Fatigue (AASHTO T321-03).

El envejecimiento de mezclas asfálticas reduce su ductilidad y aumenta su rigidez, acelerando la fatiga. Estudios realizados por el IMT México y la Federal Highway Administration (FHWA) muestran que las mezclas modificadas con polímeros o caucho reciclado pueden triplicar la vida útil ante cargas repetidas, especialmente en climas cálidos. La curva S-N permite relacionar el esfuerzo aplicado con el número de ciclos hasta la falla:

$$N_f = k \cdot (\sigma)^{-m}$$

donde N_f es el número de ciclos a fatiga, σ (sigma) el esfuerzo inducido, y k y m son coeficientes determinados experimentalmente.

Figura 1-4: Curva S-N de fatiga para pavimentos



Nota: Representa la relación entre el esfuerzo aplicado y el número de ciclos hasta la falla.

1.2.2 Mecanismos de deterioro en pavimentos flexibles

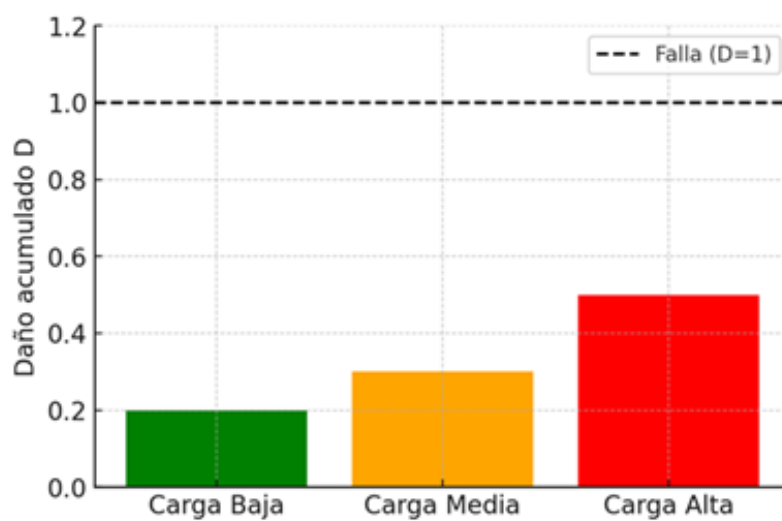
Los pavimentos flexibles presentan fisuración por fatiga como principal modo de falla estructural. La tensión de tracción en la base de la capa asfáltica aumenta con el incremento de cargas y repeticiones, hasta iniciar microfisuras que evolucionan a grietas ramificadas. En Ecuador, tramos de la Red Vial Estatal muestran deterioros acelerados en climas lluviosos por falta de drenaje y altas deflexiones, confirmando lo reportado por el Manual del Asfalto de Velázquez (2015) y SHRP-A-404.

El daño por fatiga en pavimentos flexibles se evalúa mediante el modelo de Miner, que acumula el daño de cada ciclo de carga:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}$$

donde D es el daño acumulado (falla si $D \geq 1$), n_i los ciclos aplicados y N_i los ciclos admisibles para el esfuerzo i . La NEVI-12 recomienda usar valores de CBR $\geq 8\%$ y drenaje eficiente para evitar que la humedad reduzca la vida a fatiga.

Figura 1-5: Acumulación de daño por la Ley de Miner



Nota: Muestra el daño progresivo por diferentes niveles de carga, donde $D = 1$ indica falla estructural.

1.2.3 Mecanismos de deterioro en pavimentos rígidos

El hormigón hidráulico de pavimentos rígidos falla por fatiga de flexión y erosión de la base. La repetición de cargas genera fisuración transversal en la base de la losa, intensificada por juntas mal selladas o pumping. Normativas como FAA AC 150/5320-6 y estudios de LTRC (2022) señalan que la uniformidad de soporte (módulo k) y la transferencia de carga entre losas son factores críticos para evitar fisuración temprana.

Ejemplos en aeropuertos ecuatorianos como Manta y Quito muestran la necesidad de aplicar losas con espesores ≥ 30 cm y verificar el PCN/ACN para compatibilidad aeronave-pavimento. La evaluación estructural mediante FWD (Falling Weight Deflectometer) permite detectar pérdidas de soporte antes de que aparezcan grietas superficiales, facilitando auditorías preventivas y planificación de mantenimiento.

1.2.4 Factores que influyen en la resistencia a fatiga

Los principales factores que condicionan la resistencia a fatiga son:

- Magnitud y frecuencia de cargas
- Condiciones térmicas (variación día-noche y estación)
- Humedad y drenaje de la base
- Calidad y tipo de materiales

Monismith et al. (1994) demostraron que el aumento de la temperatura de 0 °C a 20 °C puede reducir la vida a fatiga en más de 70 %, mientras que mezclas con aditivos poliméricos presentan mejoras significativas.

En Ecuador, los factores climáticos de la Costa y Amazonía aceleran el envejecimiento del asfalto, mientras que en la Sierra predomina la fatiga por bajas temperaturas nocturnas. Por ello, NEVI-12 recomienda considerar el módulo resiliente (MR), índice CBR, y análisis climático local para dimensionar el espesor y tipo de pavimento adecuado.

1.2.5 Aplicación en diseño mecanicista-empírico y auditorías

El enfoque Mecanicista-Empírico (MEPDG) integra el análisis de tensiones y deformaciones con la predicción de fatiga y permite estimar la vida útil en condiciones locales. Para auditorías, permite determinar el daño acumulado y priorizar intervenciones antes de la falla estructural.

La NEVI-12 utiliza métodos principalmente empíricos, pero la integración progresiva de criterios MEPDG y mediciones de IRI y deflexiones FWD permitirá diseños más confiables y optimización de costos de mantenimiento en carreteras y aeropuertos.

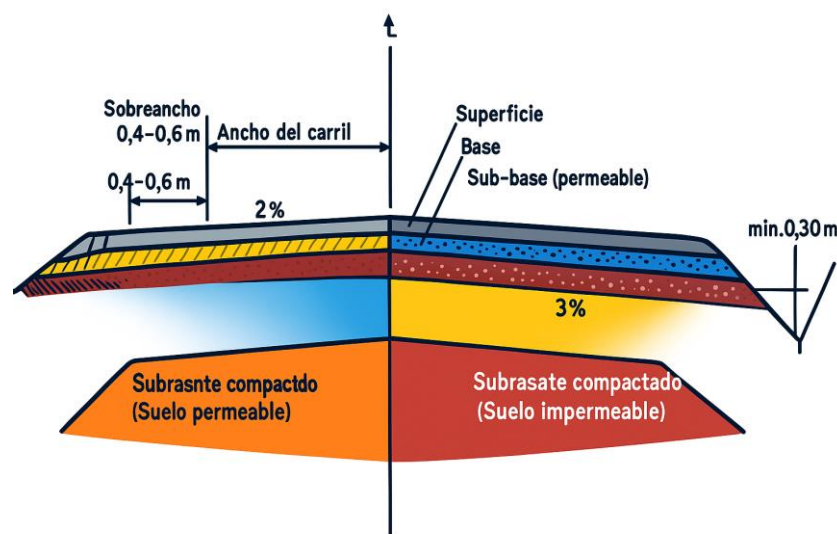
1.3 Tipología estructural: pavimentos flexibles, rígidos y compuestos

1.3.1 Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles están constituidos por varias capas superpuestas que trabajan de forma conjunta para distribuir las cargas del tránsito hacia la sub-rasante. La capa de rodadura asfáltica ofrece resistencia al desgaste y a la acción climática, mientras que la base y sub-base granular proporcionan soporte estructural y facilitan el drenaje. Este tipo de pavimento se adapta a pequeñas deflexiones sin agrietarse, manteniendo la integridad estructural. Según la NEVI-12 (Ecuador) y la AASHTO-93, el diseño considera el volumen de tráfico proyectado (ESALs), el CBR de la sub-rasante y condiciones climáticas locales.

Su principal ventaja es la rapidez constructiva y la facilidad de mantenimiento, siendo el sistema más usado en carreteras de tráfico medio y bajo en Ecuador (Clases III a V). Los ensayos de laboratorio y estudios de desempeño local indican que un $\text{CBR} \geq 8\%$ y un buen sistema de drenaje son esenciales para garantizar la vida útil. El documento Conferencia 1 resalta que la calidad de los materiales y la adecuada compactación son críticas para prevenir deformaciones y fisuración prematura.

Figura 3.1. Sección típica de pavimento flexible



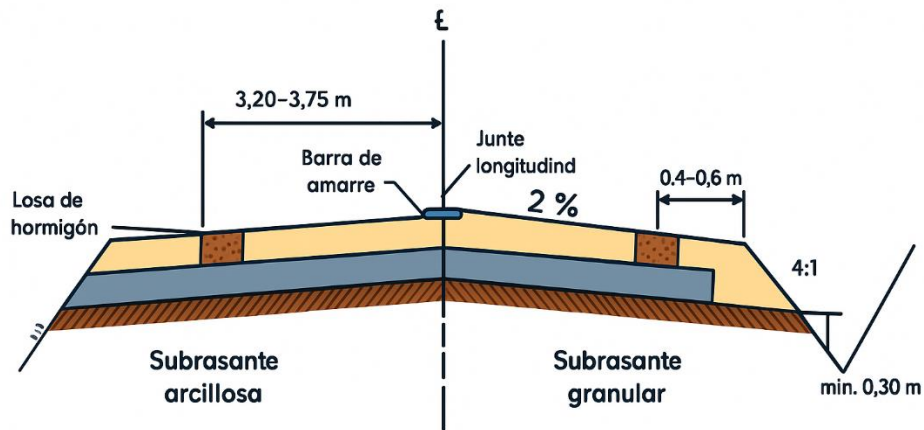
Nota. Superficie asfáltica sobre base y sub-base granular, apoyada sobre sub-rasante compactada para distribuir cargas y resistir humedad.

1.3.2 Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos están compuestos por losas de concreto hidráulico, apoyadas directamente sobre la sub-rasante o una base estabilizada. Su comportamiento estructural se basa en la teoría de placas de Westergaard, donde la losa actúa como elemento rígido que transmite cargas por flexotracción. La NEVI-12 y la FAA AC 150/5320-6 establecen que el diseño depende del módulo de reacción k de la sub-rasante, del tipo de juntas y del control de la erosión de la base. Son recomendables en autopistas, vías de alto tráfico y aeropuertos.

Estos pavimentos presentan alta durabilidad y menor frecuencia de mantenimiento, pero requieren mayor inversión inicial y cuidados en la ejecución de juntas y sellados para evitar fallas por pumping o fisuración. El archivo “Conferencia 1” describe su sección típica con losas de 3,20–3,75 m de ancho, sobre sub-rasante compactada y una base mínima de 30 cm, acorde a prácticas ecuatorianas.

Figura 1-6: Sección típica de pavimento rígido



Nota. Losa de concreto hidráulico sobre sub-rasante compactada, con juntas y refuerzos para controlar fisuración y garantizar transferencia de carga.

1.3.3 Pavimentos compuestos (mixtos)

Los pavimentos compuestos combinan las ventajas de ambos sistemas: una losa rígida o base tratada cubierta por una capa asfáltica que protege y mejora la comodidad de rodadura. Este tipo de pavimento aprovecha la rigidez del concreto para distribuir las cargas y la elasticidad del asfalto para absorber deformaciones, reducir fisuras por contracción y facilitar rehabilitaciones mediante overlays.

Aunque la NEVI-12 no lo regula explícitamente, esta tipología puede aplicarse en corredores estratégicos y pistas aeroportuarias, especialmente para rehabilitación estructural. Estudios internacionales (Virginia Tech, 2009) y experiencias de aeropuertos en EE. UU. indican que los pavimentos compuestos presentan menor costo total de ciclo de vida (LCCA) cuando se enfrentan a tránsitos superiores a 100 M ESALs o condiciones de carga de aeronaves.

1.3.4 Selección estructural y análisis técnico-económico

La selección de la tipología estructural depende de:

- Volumen y tipo de tráfico (ESALs o PCN/ACN)
- Condiciones climáticas (temperatura y lluvias)
- Capacidad portante de la sub-rasante (CBR o MR)
- Requerimientos funcionales (IRI, fricción, durabilidad)

Normas como NEVI-12, AASHTO-93 y FAA AC 150/5320-6 proporcionan guías para seleccionar la estructura adecuada considerando diseño mecanicista-empírico y auditorías de desempeño.

El análisis económico de ciclo de vida (LCCA) permite comparar el costo total de construcción, mantenimiento y rehabilitación. En Ecuador, pavimentos flexibles son más convenientes en vías rurales y urbanas de bajo tráfico, mientras que los rígidos y compuestos son recomendables en autopistas y aeropuertos, donde la durabilidad y el menor mantenimiento compensan la inversión inicial.

Tabla 1-2: Comparación de tipologías de pavimento

Tipo de Pavimento	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones Recomendadas
Flexible	Menor costo inicial, rápida construcción	Menor vida a fatiga, mantenimiento frecuente	Carreteras de tráfico medio y bajo
Rígido	Mayor durabilidad, menor mantenimiento	Mayor costo inicial, requiere juntas	Autopistas, vías de alto tráfico, aeropuertos
Compuesto	Combina rigidez y elasticidad, menor LCCA	Diseño complejo, inversión inicial elevada	Corredores estratégicos y pistas aeroportuarias

1.4 Principales mecanismos de falla

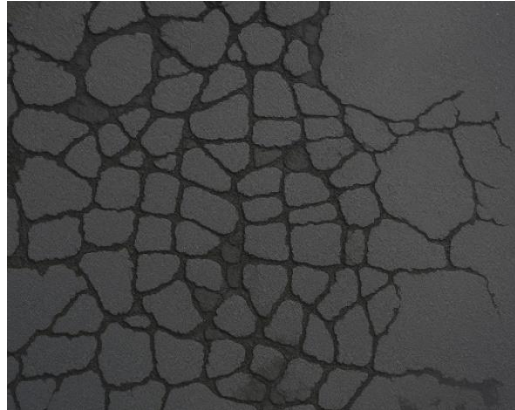
1.4.1 Fisuración por fatiga (alligator cracking)

La fisuración por fatiga, también llamada alligator cracking o crocodile cracking, se presenta cuando cargas repetidas generan redes de grietas interconectadas en la capa asfáltica inferior. Este tipo de daño es típico en pavimentos flexibles con soporte deficiente o mala evacuación de agua. Se ha registrado comúnmente en carreteras con ESALs elevados y subrasante con CBR bajo ($< 8\%$) (FHWA, 2003; Pirayonesi & El-Diraby, 2020). El deterioro suele acelerarse en presencia de ciclos térmicos que endurecen el ligante, disminuyen la ductilidad y favorecen la propagación de grietas.

Según la NEVI-12 (Volumen 3), este mecanismo es indicativo de fallas estructurales tempranas y exige evaluación geotécnica y diseño de espesores adecuados. El diseño basado en AASHTO MEPDG recomienda calcular deformación máxima tolerable en la base de mezcla asfáltica y ajustar la estructura para mantenerla por debajo del umbral de fatiga. Reparaciones comunes

incluyen fresado, relleno y recubrimiento con mezcla nueva, con atención especial a drenaje y control de carga para prevenir recurrencia (FHWA, 2003).

Figura 1-7: *Alligator cracking* en pavimento flexible



Nota. Se observa un patrón de grietas interconectadas causado por la repetición de cargas y la pérdida de capacidad estructural.

1.4.2 Deformación plástica (rutting)

El rutting es la acumulación permanente de deformación longitudinal en la zona de rodadura, causada por fluencia plástica en la mezcla asfáltica, base o subrasante. Es común en climas cálidos o bajo tráfico de vehículos pesados, y aumenta el riesgo de hidroplaneo. Estudios recientes destacan que la fatiga y el rutting son los modos dominantes en pavimentos flexibles. La magnitud del rutting depende también de la temperatura, contenido de vacíos, tipo de ligante y calidad de compactación.

Figura 1-8: Rutting longitudinal



Nota: Se aprecia una huella longitudinal causada por acumulación de deformación en la capa asfáltica bajo tráfico pesado repetido.

NEVI-12 y literatura técnica recomiendan aseguramiento del modulus resiliente del suelo ($MR > CBR$ mínimo), control de temperatura durante puesta (compactación óptima) y uso de ligantes modificados para mejorar la rigidez. Las técnicas de simulación y modelado facilitan prever la profundidad de ruts según configuración estructural (AASHTO MEPDG). El mantenimiento incluye perfiles láser para medición, fresado y nivelación mediante overlays adecuados para restablecer la geometría superficial.

1.4.3 Desgaste superficial (ravelling)

El ravelling ocurre cuando el ligante pierde adherencia y los agregados se desprenden de la superficie asfáltica, reduciendo fricción y aumentando el envejecimiento prematuro. Este proceso también favorece la entrada de agua a las capas inferiores, debilitando la estructura. Es común en pavimentos con mezclas pobres o uso de RAP en exceso sin rejuvenecedores adecuados (Pavement Interactive, 2024). El desgaste también se relaciona con la oxidación del ligante, que se vuelve más rígido y quebradizo ante condiciones ambientales agresivas.

La NEVI-12 exige materiales y mezclas con especificaciones de ligante y granulometría que eviten vacíos elevados ($> 5\%$) y aseguren buena adherencia. El mantenimiento incluye sellado de fisuras, microaglomerados o tratamientos superficiales. Los estándares internacionales resaltan el uso de binder rejuvenators y reparación localizada como estrategias costo-efectivas para evitar fallas estructurales mayores. Revisiones periódicas con PCI (Pavement Condition Index) detectan zonas afectadas antes de su propagación (FHWA DIM, 2003).

1.4.4 Fisuración y faulting en pavimentos rígidos

En pavimentos rígidos, la fisuración en esquina y transversal se relaciona con tensiones de flexotracción inducidas por cargas puntuales y efectos térmicos. La losa sufre microfisuras que evolucionan en esquina y centro, especialmente ante juntas mal diseñadas. La FAA AC 150/5320-6 enfatiza que el soporte uniforme (módulo-k) y separación adecuada de juntas son críticos para prevenir estas fallas. También se observa faulting, o escalonamiento en juntas, consecuencia de pérdida de soporte o pumping entre losas adyacentes (pavementinteractive; slideshare).

La NEVI-12 requiere pruebas como FWD para evaluar el soporte estructural bajo las losas. El pumping, mencionado también en ICAO, ocurre cuando la erosión de finos por infiltración genera vacío bajo la losa. Las soluciones incluyen renovación de juntas, inyección de lechadas estabilizantes y reconstrucción puntual. Juntas bien selladas y drenaje eficiente minimizan el daño. Estudios recientes en pavimentos aeroportuarios fundamentan que una base estable y sellante adecuado prolongan vida útil de las losas rígidas (slideshare & pavementinteractive).

Figura 1-9: Falla por faulting y fisuración en esquina en pavimento rígido



1.4.5 Mecanismos térmicos, reflexivos y microfisuración

Otros mecanismos de falla incluyen fisuración térmica, generada por contracción del pavimento ante bajas temperaturas, y fisuración reflexiva, que ocurre cuando overlays asfálticos replican grietas existentes en capas rígidas. También aparecen microfisuras por envejecimiento oxidativo del ligante, especialmente en mezclas con RAP sin aditivos rejuvenecedores. Investigaciones recientes de Ghauch & Abou-Jaoude (2011) muestran cómo tensiones horizontales y de cizalla inducen grietas desde la base del overlay (bottom-up reflective cracking).

La NEVI-12 no cubre explícitamente overlays reflexivos, pero la práctica internacional (FHWA, AASHTO) recomienda tratamientos preventivos: cuarteo previo, uso de geosintéticos y diseño de overlay con espesor suficiente para minimizar tensiones de base. Además, controlar envejecimiento mediante aditivos y selección adecuada de ligante reduce microfisuración superficial. En climas fríos y montañosos del Ecuador, estos mecanismos deben considerarse cuidadosamente en diseño y mantenimiento.

1.5 Normativas técnicas internacionales (AASHTO, ICAO, FAA)

1.5.1 AASHTO Guide for Design of Pavement Structures

La guía AASHTO (1993) define métodos estructurales para pavimentos flexibles y rígidos basados en pruebas del AASHO Road Test, estableciendo variables como ESALs, PSI inicial y terminal, y confiabilidad del diseño (AASHTO, 1993). Se aplica ampliamente en EE. UU. y América Latina, adaptando variables climáticas y materiales locales mediante calibración (InTrans, 2020). NEVI-12 incorpora estos criterios para estimar espesor estructural y vida útil mediante el enfoque mecanicista-empírico (MEPDG), asegurando compatibilidad con prácticas internacionales.

Los parámetros incluyen la diferencia de servicio ($\Delta PSI = P_o - P_t$), donde $P_o \approx 4.2/4.5$ y P_t entre 2.00 y 2.50 según tipo de vía (Polk & Transporte, 2020). Los valores de confiabilidad y desviación estándar también determinan factores de redundancia en el diseño. Además, las ecuaciones AASHTO usan módulos del suelo (CBR, MR) y coeficientes de pérdida de soporte (k) para dimensionar la estructura final.

Tabla 1-3: Valores de P_o , P_t y confiabilidad recomendada según tipo de vía

Tipo de vía / proyecto	PSI inicial (P_o)	PSI terminal (P_t)	Confiabilidad (%)
Autopistas principales	4.5	2.5	90 – 95
Carreteras secundarias	4.2	2.0	80 – 85
Vías rurales / terciarias	4.0	2.0	70 – 80

Nota. Estos valores son referenciales para diseños AASHTO; la confiabilidad se ajusta según tráfico proyectado y criticidad del corredor.

1.5.2 FAA – Airport Pavement Design (AC 150/5320-6)

La FAA AC 150/5320-6 establece criterios para pavimentos aeroportuarios, incluyendo clasificación PCN/ACN, dimensionamiento de losas de concreto y criterios de deflexión máxima aceptable (FAA, 2016). Para pistas, rodajes y plataformas, se requiere evaluación del módulo de reacción k, transferencia de carga en juntas y tolerancia de presión neumática. La normativa incorpora pruebas in situ (FWD) y límites máximos de deflexión para evitar fisuración y faulting por pérdida de soporte.

Este enfoque es fundamental para aeropuertos en Ecuador como Quito o Manta, donde se requieren estructuras capaces de resistir cargas concentradas de aeronaves pesadas. FAA enfatiza sellado de juntas y drenaje adecuado para evitar “pumping”, y compatibilidad de pista mediante PCN/ACN conforme ICAO.

1.5.3 ICAO Anexo 14 – Pavimentación de Aeródromos

La ICAO Anexo 14 regula diseño de pistas y rodajes enfocada en seguridad operativa y compatibilidad pavimento-aeronave mediante el sistema PCN/ACN. El estándar evalúa tipo de pavimento, capacidad de carga, presión neumática y método de evaluación técnica o práctica (OACI, 2024). El PCN se expresa mediante cinco códigos que incluyen tipo, capa, resistencia de base y método de cálculo.

ICAO complementa a FAA en normativa global y es esencial para proyectos con financiamiento internacional. En Ecuador, los aeropuertos deben cumplir estos criterios para obtener certificación de la OACI y garantizar durabilidad ante tráfico aeronáutico intenso

Tabla 1-4: Códigos de clasificación de pavimentos aeroportuarios (PCN/ACN)

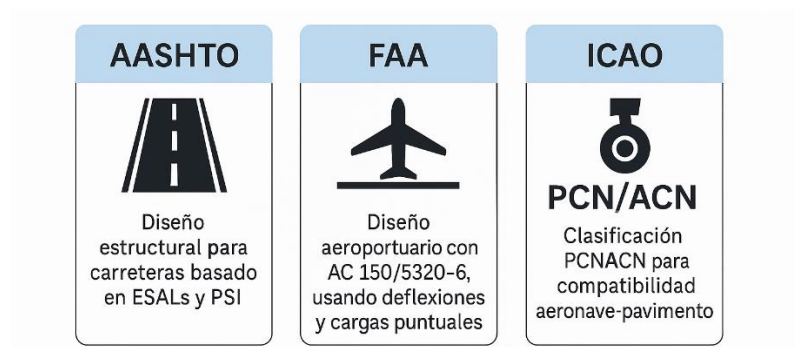
Elemento	Descripción	Ejemplo
PCN	Pavement Classification Number, indica capacidad estructural	50/F/B/X/T
ACN	Aircraft Classification Number, indica carga equivalente de aeronave	47
Tipo de pavimento	F = Flexible / R = Rígido	F
Categoría de subrasante	A = Fuerte, B = Media, C = Débil, D = Muy débil	B
Método de evaluación	T = Técnica / U = Uso operacional	T

Nota. Permite determinar la compatibilidad aeronave-pavimento: operación segura cuando $ACN \leq PCN$.

1.5.4 Integración en NEVI-12 y especificaciones ecuatorianas

La NEVI-12 (Volumen 2A-3) armoniza criterios ecuatorianos con AASHTO, FAA e ICAO, incorporando parámetros técnicos como ESALs, módulos CBR, y sistemas de clasificación de tráfico adaptado (MTOP, 2013). El manual exige pruebas geotécnicas, caracterización de tráfico, selección de tipología estructural y vida útil proyectada, alineadas con estándares internacionales.

Figura 1-10: Comparación entre sistemas de diseño y evaluación de pavimentos



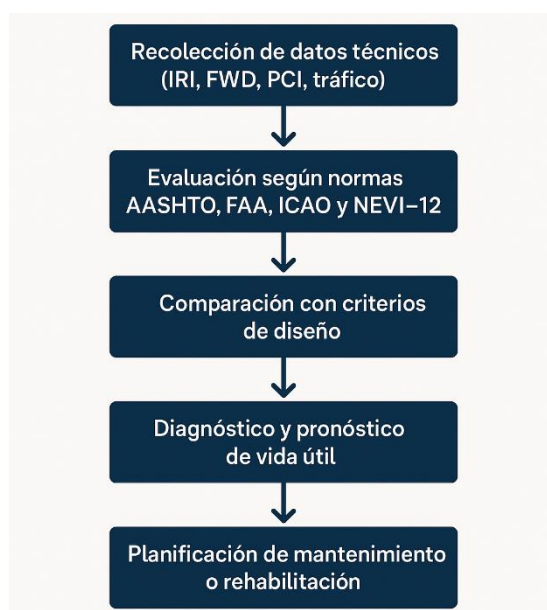
Además, NEVI-12 establece criterios de diseño de juntas, drenaje y deflexión que reflejan la filosofía FAA/ICAO para pavimentos rígidos y la de AASHTO para flexibles. Esta integración facilita auditorías viales y asegura que los diseños sean comparables a nivel global.

1.5.5 Comparación normativa y aplicación en auditorías

A nivel operativo, la AASHTO proporciona los métodos estándar para el diseño estructural de carreteras, mientras que la FAA y la ICAO establecen los sistemas de evaluación crítica para aeródromos. En auditorías viales y aeroportuarias, los profesionales evalúan el estado estructural mediante indicadores como el Índice de Regularidad Internacional (IRI), las deflexiones medidas con FWD (Falling Weight Deflectometer) y el Índice de Condición de Pavimento (PCI). Estos datos se comparan con los criterios normativos definidos en el diseño inicial para determinar la necesidad de mantenimiento o rehabilitación y la vida útil remanente de la infraestructura.

Por ejemplo, una carretera diseñada bajo AASHTO para 20 millones de ESALs debe cumplir con un PSI terminal y una vida útil proyectada de 30 años. En cambio, una pista aeroportuaria clasificada como PCN 50/F/B/Y/T podrá operar aeronaves con $ACN \leq 50$, garantizando compatibilidad aeronave-pavimento y seguridad operacional. Este análisis normativo permite planificar mantenimiento proactivo, priorizar refuerzos estructurales y evitar fallas críticas que generen altos costos de rehabilitación.

Figura 1-11: Proceso de auditoría estructural de pavimentos



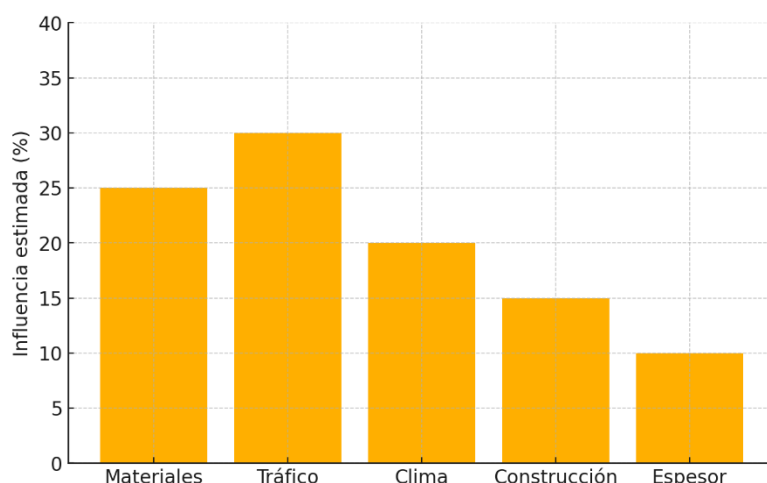
Nota. El diagrama muestra las etapas de recolección de datos, comparación normativa, diagnóstico y planificación de mantenimiento según AASHTO, FAA, ICAO y NEVI-12.

1.6 Introducción a metodologías empíricas y mecanicistas

1.6.1 Materiales y calidad de la mezcla

La durabilidad del pavimento comienza con la selección de materiales adecuados: agregados limpios y bien gradados, ligante asfáltico de calidad, contenido de vacíos controlado y propiedades mecánicas apropiadas. Según el Departamento de Transporte de Wisconsin (WisDOT, 2014), la durabilidad depende principalmente de la resistencia al envejecimiento y la estabilidad de la mezcla asfáltica. Investigaciones recientes indican que una compactación deficiente puede reducir la vida útil hasta en un 40 % (AsphaltInc, 2023), evidenciando la importancia de la calidad en la fabricación y colocación.

Figura 1-12: Influencia relativa de los factores en la durabilidad del pavimento



Nota. Muestra la contribución aproximada de materiales, tráfico, clima, calidad constructiva y espesor al desempeño a largo plazo.

La NEVI-12 (Vol. 3) establece que las mezclas deben mantener vacíos $\leq 5\%$, emplear agregados con dureza mínima certificada, y preferir ligantes modificados con polímeros o caucho para mejorar la resistencia a fatiga en climas cálidos. Además, un control de calidad riguroso durante la construcción y la verificación de densidades capa por capa previenen fallas tempranas como ravelling, ahuellamiento y fisuración, asegurando la vida útil proyectada del pavimento.

1.6.2 Tráfico y carga vehicular

La carga vehicular es uno de los factores críticos: el daño al pavimento aumenta aproximadamente con la cuarta potencia de la carga del eje (ley de la cuarta potencia)

(Pavement Interactive, 2024). Tráfico pesado acumulado (ESALs) es determinante para definir el diseño estructural inicial y prever mantenimiento futuro, según AASHTO y NEVI-12.

Investigaciones recientes con modelos predictivos (gls, bosques aleatorios sobre datos LTPP) confirman que cargas pesadas, tráfico y tipo de vehículo explican hasta el 60 % de la variabilidad del estado del pavimento (Llopis-Castelló et al., 2020). El diseño debe contemplar tipología de tránsito, frecuencia, presión de neumáticos y distribución de carga por eje.

1.6.3 Condiciones climáticas y ambientales

Las condiciones ambientales como temperatura, ciclos húmedo-seco, radiación UV y lluvia afectan profundamente la durabilidad. Ciclos de frío y deshielo aceleran fisuras, mientras la oxidación del ligante endurece la mezcla asfáltica. Pavimentos expuestos a radiación intensa o lluvias frecuentes deterioran más rápido sin drenaje adecuado.

La NEVI-12 recomienda diseñar pendientes longitudinales y sistemas de drenaje eficientes para evitar acumulación de humedad en base y subrasante, especialmente en zonas lluviosas como la costa ecuatoriana. La selección de ligante apropiado para la temperatura local y pruebas climáticas reducen el envejecimiento prematuro y la formación de microfisuras.

Tabla 1.6.1. Vida útil estimada de pavimentos flexibles según condiciones climáticas

Condición climática	Vida útil estimada (años)	Observaciones principales
Clima seco o semiárido	18 – 25	Baja humedad, menor deterioro por humedad; riesgo de oxidación del ligante.
Clima templado húmedo	12 – 18	Mayor efecto de ciclos de humedad y fatiga por tránsito.
Clima tropical lluvioso	8 – 15	Alta humedad, riesgo de ahuellamiento y pérdida de soporte por drenaje deficiente.
Clima frío con deshielo	10 – 16	Ciclos de congelación y deshielo aceleran fisuración y desprendimientos.

Nota. Valores referenciales basados en experiencias de NEVI-12, AASHTO MEPDG y literatura técnica sobre desempeño de pavimentos. La vida útil real depende del diseño estructural, calidad de materiales y mantenimiento preventivo.

1.6.4 Calidad de construcción y supervisión

Un factor importante es la ejecución adecuada y control técnico durante la construcción: compactación óptima, juntas selladas, compactación continua y uniformidad en la base y sub-base. Estudios reportan que la compactación deficiente reduce la vida del pavimento entre 30 % y 50 %. Infiltración de agua por juntas mal selladas o zanjas mal compactadas acelera fallas por fatiga o pumping.

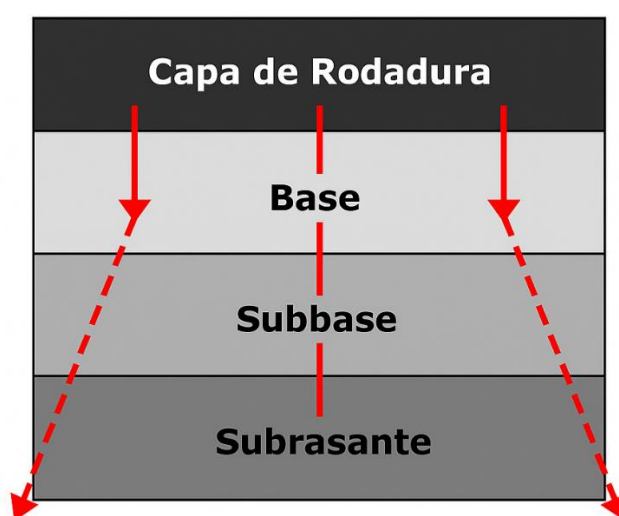
NEVI-12 establece procedimientos de control en campo y laboratorio desde pre-mezcla hasta la entrega de obra, exigiendo muestreos periódicos y pruebas de densidad, capa por capa. La supervisión técnica constante durante la construcción garantiza la durabilidad esperada conforme al diseño estructural y previene deficiencias subsiguientes.

1.6.5 Estructura y espesor adecuados del pavimento

El espesor de las capas y la estructura combinada (base, sub-base, rodadura) son esenciales para asegurar durabilidad. El diseño debe basarse en el módulo resiliente del suelo (MR o CBR), ESALs proyectados, y confiabilidad deseada. AASHTO MEPDG y NEVI-12 promueven dimensionamiento que evite esfuerzos excesivos en subrasante.

Investigaciones revelan que la estructura mal diseñada, con capas delgadas o base pobre, tiende a fallar prematuramente incluso con tráfico moderado (Llopis-Castelló et al., 2020; Pavement.com.au, 2022). Por tanto, respetar espesores mínimos y garantizar uniformidad asegurando carga distribuida prolonga significativamente la vida útil prevista.

Figura 1-13: Distribución de tensiones en un pavimento multicapa.



Nota. Ilustra cómo las cargas se transfieren y se dispersan a través de las capas estructurales hasta la subrasante.

1.7 Factores que influyen en la durabilidad del pavimento

1.7.1 Enfoque empírico tradicional

El enfoque empírico se basa en la observación histórica y en correlaciones experimentales entre tráfico, materiales y desempeño, como se hizo en el AASHO Road Test (Illinois, 1958-1960). Este método utiliza parámetros simplificados, como el Número Estructural (SN) para pavimentos flexibles y el espesor de losa para rígidos, ajustados mediante factores de equivalencia de ejes (ESALs). Su principal ventaja es la simplicidad y comprobación práctica, aunque depende de condiciones locales y requiere factores de ajuste para suelos y climas diferentes al del ensayo original (AASHTO, 1993).

El método AASHTO-93, todavía referencial en Ecuador según la NEVI-12, se considera empírico porque su ecuación de diseño se derivó de datos experimentales y no de cálculos estructurales explícitos. Funciona adecuadamente para carreteras convencionales, pero su limitación es que no predice mecanismos de falla específicos, como ahuellamiento o fisuración, sino que estima la pérdida de servicio (PSI) en función de ESALs acumulados.

La fórmula base para el Número Estructural (SN) en pavimentos flexibles según AASHTO-93 es:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{40 + \frac{1049}{SN^{5.19}}}$$

Donde:

- W_{18} = ESALs acumulados de diseño
- Z_R = desviación normal estándar para confiabilidad
- S_0 = desviación estándar combinada
- ΔPSI = pérdida de servicio ($P_o - P_t$)
- SN = número estructural requerido

1.7.2 Enfoque mecanicista

El enfoque mecanicista analiza los pavimentos desde la ingeniería estructural, calculando esfuerzos, deformaciones y deflexiones en cada capa mediante modelos elásticos o viscoelásticos. Este método permite predecir modos de falla específicos, como fatiga en capas asfálticas o fractura por flexotracción en losas de concreto (Huang, 2012). Se requieren

propiedades como el módulo resiliente (MR) de suelos y bases, y el módulo dinámico ($|E|$) * de mezclas asfálticas, medidos en laboratorio o mediante retroanálisis con FWD.

Su principal ventaja es que permite optimizar espesores y realizar análisis de sensibilidad ante variaciones de tráfico, clima y materiales. Además, facilita la adopción de materiales reciclados o modificados evaluando su comportamiento estructural real. Sin embargo, requiere mayor información geotécnica y climática y herramientas de modelación especializada como KENPAVE o EverStressFE.

Para pavimentos flexibles, se recomienda incluir la ecuación de fatiga de asfalto de tipo S-N:

$$Nf = k_1 \cdot (\epsilon t)^{-k_2} \cdot (E)^{-k_3}$$

Donde:

- Nf = número de repeticiones hasta la falla por fatiga
- ϵt = deformación unitaria de tracción en la base de la mezcla asfáltica
- E = módulo del asfalto (MPa)
- k_1, k_2, k_3 = constantes empíricas de laboratorio

Para pavimentos rígidos, puede agregarse la ecuación de Westergaard para la tensión de borde:

$$\sigma = 3 \cdot \frac{P_2}{\pi \cdot h^2} \left(1 - \frac{a}{l} \right)$$

Donde:

- P = carga aplicada
- h = espesor de la losa
- a = radio de distribución de carga
- l = radio relativo de rigidez

1.7.3 Metodología mecanicista-empírica (MEPDG)

El MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) combina cálculo estructural mecanicista con calibración empírica basada en datos históricos y de desempeño (AASHTO, 2008). Primero se calculan esfuerzos y deformaciones en las capas bajo cargas repetidas, y luego se predice el deterioro (fatiga, ahuellamiento, fisuración térmica) comparando con límites empíricos validados en campo.

Este enfoque es considerado el estándar moderno en EE. UU. y otros países, y es la base de futuras actualizaciones de la NEVI-12. Su ventaja principal es que permite adaptar el diseño a condiciones locales, integrando factores climáticos, cargas de tráfico reales y propiedades de materiales, mejorando la predicción de vida útil y plan de mantenimiento.

Tabla 1-5: Comparación de metodologías de diseño de pavimentos

Metodología	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones recomendadas
Empírica	- Simple y rápida de aplicar. - Requiere pocos datos. - Basada en experiencia histórica.	- No predice modos de falla específicos. - Limitada a condiciones del ensayo original.	Vías rurales, carreteras de bajo a medio tráfico.
Mecanicista	- Evalúa esfuerzos, deformaciones y deflexiones. - Predice mecanismos de falla estructural.	- Requiere propiedades avanzadas de materiales. - Demanda software y modelación especializada.	Proyectos de alta exigencia estructural y optimización de espesores.
Mecanicista-Empírico (MEPDG)	- Combina cálculo estructural y calibración empírica. - Predice deterioro y vida útil real.	- Mayor costo inicial de estudios y datos. - Necesita calibración local y experiencia técnica.	Autopistas, aeropuertos y proyectos estratégicos de alta inversión.

Nota. La metodología seleccionada debe responder al tipo de vía, tráfico proyectado, disponibilidad de datos y recursos técnicos del proyecto.

1.7.4 Aplicación en Ecuador y Latinoamérica

En Ecuador, la NEVI-12 sigue siendo predominantemente empírica, basada en AASHTO-93, aunque incorpora criterios de módulo resiliente y deflexiones como transición hacia el diseño mecanicista-empírico. Países vecinos como Colombia, Perú y Chile ya han iniciado la calibración local del MEPDG, utilizando datos de deflexiones FWD y monitoreo con PCI e IRI para carreteras estratégicas y corredores internacionales.

Para aeropuertos, la adopción de criterios FAA y PCN/ACN permite compatibilidad internacional, mientras que la integración del enfoque mecanicista-empírico mejorará la planificación de mantenimiento y reducirá costos de ciclo de vida (Llopis-Castelló et al., 2020). Este proceso requiere inversión en instrumentación, ensayos de laboratorio y modelación computacional para lograr diseños confiables y sostenibles.

Capítulo 2. Tránsito y Cargas Actuantes

2.1 Clasificación del tránsito vehicular por ejes

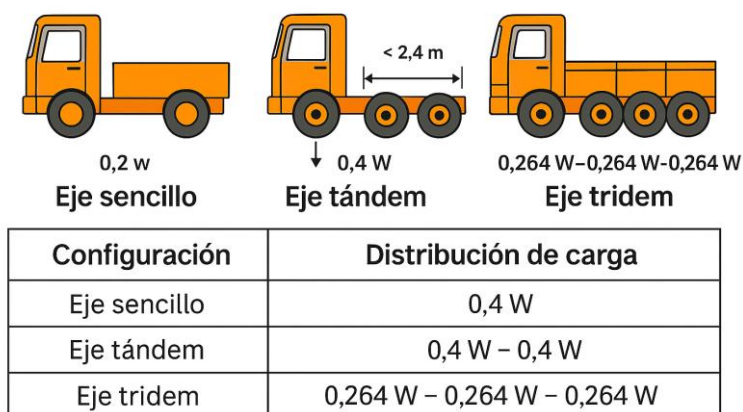
2.1.1 Definición y tipos de ejes vehiculares

Los ejes vehiculares se clasifican según su configuración y la distribución de carga que transmiten al pavimento:

- **Eje sencillo:** rueda simple o doble, típico en automóviles y camionetas.
- **Eje tandem:** dos ejes próximos con ruedas dobles, frecuente en camiones medianos.
- **Eje tridem:** tres ejes consecutivos con ruedas dobles, usado en transporte de carga pesada y tráileres.

Cada tipo de eje tiene un efecto distinto sobre el pavimento, ya que la carga no es linealmente proporcional al daño. Su correcta identificación es esencial para estimar el tránsito estructural que soportará la vía.

Figura 2-1: Esquema de ejes sencillo, tandem y tridem con distribución de carga



2.1.2 Relevancia para el diseño estructural del pavimento

El daño estructural de un pavimento depende más de la magnitud de la carga por eje que del número total de vehículos. Según la Ley de la Cuarta Potencia (AASHTO, 1993), duplicar la carga de un eje puede multiplicar su daño hasta 16 veces. Por ello, las normas internacionales como AASHTO y NEVI-12 emplean el eje equivalente de 8.2 t (18 kips) como referencia para comparar el efecto de diferentes configuraciones de carga.

Esta clasificación permite transformar una flota heterogénea de vehículos en un número de ejes equivalentes diarios, que luego será la base para calcular los ESALs proyectados en el epígrafe

2.2. De esta manera, el diseño se enfoca en la carga estructural real en lugar del simple conteo de vehículos.

2.1.2.1 Fórmula de Factor de equivalencia por eje

El factor de equivalencia (Fe) convierte un eje real en ejes estándar equivalentes y se determina con la fórmula:

$$Fe = \left(\frac{W_i}{W_{ref}} \right)^n$$

Donde

- W_i es la carga del eje (t)
- $W_{ref} = 8.2$ toneladas
- $n=4$ (pavimentos flexibles) o 4.5 (rígidos).

La contribución de cada eje al diseño se expresa en número de ejes equivalentes. Este valor sirve para convertir el tránsito diario por tipo de eje en ejes equivalentes de referencia, permitiendo proyectar los ESAL acumulados para el periodo de diseño. La NEVI-12 recomienda utilizar este método para clasificar el tránsito por clases T1–T5 según número de ejes equivalentes (MTOP, 2013).

2.1.2.2 Ejemplo práctico de clasificación por ejes

Supongamos una carretera rural con:

- TPD = 500 vehículos;
- 15 % son camiones
- Cada camión tiene 2 ejes tandem (16 t por eje)
- Vehículos Livianos = 1 eje sencillo (8 t).

Ejemplo práctico:

Tipo de eje	Carga por eje (t)	Factor F_{ei}	Nº de ejes/día N_i	Ejes equivalentes/día
Sencillo	8	0.90	425	386.0
Tándem	16	$\left(\frac{16}{8.2}\right)^4 = 14.50$	150	2175.0
Total	-	-	575	2567.0

2.1.3 Aplicación en carreteras rurales y urbanas

- En vías rurales, la proporción de ejes tándem y tridem es alta; el diseño debe priorizar la resistencia estructural.
- En vías urbanas, predominan ejes sencillos, pero la presencia de buses y camiones de reparto genera impactos que no deben subestimarse.

En ambos casos, la clasificación por ejes y conversión a ejes equivalentes diarios es el primer paso para definir el carril de diseño y dimensionar el pavimento.

2.2 Cálculo del tránsito de diseño y crecimiento proyectado

2.2.1 Tránsito de diseño y conceptos

El tránsito de diseño es el número de ejes equivalentes acumulados (ESALs) que un pavimento debe soportar durante su vida útil. Se obtiene transformando el tránsito promedio diario (TPD) en ejes equivalentes diarios (calculado en 2.1), y luego aplicando factores de dirección, carril y proyección de crecimiento.

Según AASHTO (1993) y NEVI-12, este proceso garantiza que el pavimento se dimensione para el carril más cargado, ya que es donde se concentran las solicitaciones críticas. Este valor proyectado es la base para determinar el Número Estructural (SN) en pavimentos flexibles o el espesor de losa en pavimentos rígidos.

2.2.2 Factores de direccionalidad y de carril

No todo el tránsito circula por el mismo carril ni en la misma dirección, por lo que se aplican:

$$ESAL_{ajustado} = ESAL_{día} \times F_{dir} \times F_{carril}$$

Donde:

- F_{dir} = fracción de tráfico en la dirección de diseño (0.5 en carreteras bidireccionales)
- F_{carril} = fracción de tráfico pesado en el carril de diseño (0.9 para 1 carril por sentido según NEVI-12).

Ejemplo aplicado (continuación de 2.1):

- **ESAL diarios = 2 561**
- $F_{dir} = 0.5$
- $F_{carril} = 0.9$

$$ESAL_{ajustado} = 2561 \times 0.5 \times 0.90 = 1152.45$$

2.2.3 Proyección del tránsito con tasa de crecimiento

Para considerar el incremento de tráfico futuro, se aplica una tasa de crecimiento anual (g) y un período de diseño (n). La proyección se realiza mediante el Factor de Crecimiento Acumulado (FGA):

$$FGA = \frac{(1+g)^n - 1}{g}$$

$$ESAL_{total} = ESAL_{ajustado} \times 365 \times FGA$$

Ejemplo:

- $g = 4\%$ (0.04)
- $n = 10$ años

$$FGA = \frac{1.04^{10} - 1}{0.04} = 12.01$$

$$ESAL_{total} = 1152.45 \times 365 \times 12.01 = 5.05 \times 10^6$$

Este valor es el tránsito de diseño que el pavimento debe resistir durante su vida útil.

Tabla 2-1: Cálculo de ESALs de diseño para una carretera rural

Etapas de cálculo	Resultado
ESAL diarios (de 2.1)	2 561
ESAL ajustados ($\times F_{dir} \times F_{carril}$)	1 152.45
Factor de crecimiento acumulado (FGA)	12.01
ESALs proyectados (10 años)	5.05×10^6

2.2.4 Importancia para el diseño estructural

El ESAL proyectado permite:

1. Determinar la clase de tránsito según NEVI-12.
2. Seleccionar el Número Estructural (SN) o el espesor de losa adecuado.
3. Definir el plan de mantenimiento preventivo, ya que el tráfico acumulado anticipa el desgaste estructural.

En vías urbanas, con menores distancias, pero tráfico intenso, el crecimiento puede ser menor, pero el efecto de buses urbanos debe considerarse. En vías rurales, el crecimiento puede ser mayor por expansión productiva y transporte de carga.

2.2.5 Factores equivalentes de carga (FCE)

Los Factores Equivalentes de Carga (FCE) permiten transformar la diversidad de cargas por eje que transitan por una vía en una unidad común de daño estructural, normalmente un eje simple estándar de 8.2 toneladas (AASHTO Road Test). Este concepto es esencial, ya que el daño inducido por las cargas no es lineal, sino que sigue la ley de la cuarta potencia: un eje que duplica la carga estándar puede causar hasta 16 veces más daño en un pavimento flexible. La determinación del FCE considera el tipo de eje (simple, tandem o tridem), la presión de inflado de las llantas y la configuración de las ruedas.

La ecuación general para calcular el **factor de equivalencia por eje** es:

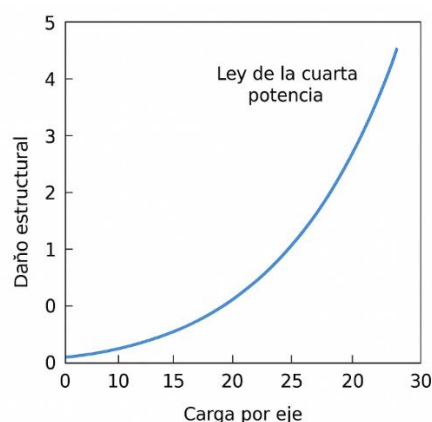
$$Fe_i = \left(\frac{P_i}{P_o} \right)^n$$

Donde:

- P_i = carga del eje a evaluar (toneladas)
- P_o = carga estándar (8.2 t para ejes simples)
- n = exponente (≈ 4 para pavimentos flexibles y 4.5 para rígidos)

Este valor se multiplica por el número de ejes de cada tipo para obtener los Ejes Simples Equivalentes (ESALs), que son la base del dimensionamiento estructural.

Figura 2-2: Curva de relación carga por eje – daño estructural



Nota: Muestra cómo el daño al pavimento aumenta exponencialmente con la carga por eje, evidenciando la sensibilidad a sobrecargas.

Ejemplo práctico:

Supongamos una vía rural con TPD = 400 vehículos, de los cuales 20 % son camiones. Cada camión tiene 2 ejes tandem con carga promedio de 14 t/eje.

1. Cálculo del FCE para ejes tandem:

$$Fe = \left(\frac{14}{8.2}\right)^4 = 8.6$$

2. Contribución diaria:

$$N_{eq} = 80 \text{ camiones} \times 2 \text{ ejes tandem} \times 8.6 = \frac{1376 \text{ ESAL}}{\text{día}}$$

3. Proyección anual:

$$ESAL_{anual} = 1376 \times 365 = 5.0 \times 10^5$$

Este valor se ajusta por factores de direccionalidad (Fd) y carril de diseño (Fc), normalmente 0.5 y 0.9 respectivamente, para determinar el tránsito acumulado que servirá como base para la selección del Número Estructural (SN).

Tabla 2-2: Factores equivalentes de carga para diferentes tipos de ejes

Tipo de eje	Configuración de llantas	Carga típica (t)	Pavimento flexible (n=4)	Pavimento rígido (n=4.5)
Sencillo liviano	2 llantas	6	0.48	0.45
Sencillo estándar	2 llantas	8.2	1.00	1.00
Sencillo pesado	4 llantas	10	2.21	2.40
Tándem medio	8 llantas	14	8.57	9.50
Tándem estándar	8 llantas	16	14.50	15.80
Tridem estándar	12 llantas	24	49.00	55.20

Nota. Los valores corresponden a cálculos basados en la Ley de la Cuarta Potencia para pavimentos flexibles y 4.5 para rígidos, considerando como referencia un eje simple de 8.2 t (18 kips). Se deben ajustar según el pesaje real obtenido con estaciones WIM o básculas portátiles en el proyecto.

2.3 Evaluación de solicitaciones acumuladas

Las solicitaciones acumuladas representan el efecto total de las cargas repetidas sobre el pavimento durante su vida útil. A diferencia de una carga aislada, los pavimentos están sometidos a millones de repeticiones que provocan fatiga en mezclas asfálticas y deflexiones acumuladas en suelos y bases.

Este análisis utiliza los ESALs proyectados (calculados en 2.2 y 2.3) para cuantificar la demanda estructural. Según AASHTO (1993) y NEVI-12, este enfoque permite comparar la resistencia estructural disponible con el deterioro esperado, estableciendo si el pavimento cumplirá su vida de diseño sin fallas críticas como ahuellamiento, fisuración o fractura de losas.

2.3.1 Conversión de tránsito a ciclos de carga

Para evaluar el efecto del tránsito, se convierte el número de ejes equivalentes (ESALs) en ciclos de carga aplicados sobre el pavimento. Cada pasada de eje genera un ciclo de esfuerzo que contribuye al deterioro.

La relación entre tránsito y ciclos de carga se define como:

$$N_{ciclos} = ESAL_{total} \times F_{repetición}$$

Donde $F_{repetición}$ representa la cantidad de ciclos de tensión que un ESAL genera en un punto crítico de la estructura, usualmente determinado mediante modelos mecanicistas. Esta conversión es clave para analizar fatiga y deformación permanente en los siguientes epígrafes.

2.3.2 Evaluación estructural mediante deflexiones

El análisis de solicitaciones acumuladas se complementa con mediciones de deflexión para verificar la capacidad estructural. El uso de FWD (Falling Weight Deflectometer) permite determinar deflexiones máximas y curvas de rebote, que representan la respuesta del pavimento a cargas repetidas.

En pavimentos flexibles, las deflexiones altas indican riesgo de fatiga en capas asfálticas y bombeo en bases, mientras que, en pavimentos rígidos, valores excesivos pueden asociarse a pérdida de soporte de subrasante. Integrar ESALs acumulados y deflexiones medidas permite calibrar el modelo estructural, alineándose con MEPDG y NEVI-12.

2.3.3 Ejemplo de evaluación de solicitaciones acumuladas

Supongamos que la **carretera rural del ejemplo 2.2** tiene:

- $ESAL_{total} = 5.05 \times 10^6$

- Deflexión máxima medida $D_{\max} = 0.85 \text{ mm}$
- Límite de diseño $D_{\text{adm}} = 1.0 \text{ mm}$

El índice de utilización estructural (IUE) puede calcularse como:

$$IUE = \frac{ESAL_{\text{total}}}{ESAL_{\text{capacidad}}} \times 100$$

Si la capacidad estructural estimada es 7×10^6 ESALs, entonces:

$$IUE = \frac{5.05 \times 10^6}{7 \times 10^6} \times 100 = 72.1\%$$

Este valor indica que el pavimento cumple con la vida de diseño con un margen de seguridad adecuado.

2.3.4 Integración con diseño y mantenimiento

La evaluación de solicitaciones acumuladas no solo sirve para el diseño inicial, sino también para gestión y mantenimiento vial. Al conocer el porcentaje de consumo de vida útil, se pueden programar refuerzos antes de que se alcance la fatiga terminal del pavimento.

Normas como AASHTO, MEPDG y NEVI-12 recomiendan combinar:

1. ESALs acumulados
2. Deflexiones FWD
3. Índice de condición PCI

De esta forma se obtiene una evaluación integral, orientada a extender la vida útil y reducir costos de rehabilitación.

2.4 Efectos repetitivos: fatiga y deformación permanente

2.4.1 Mecanismos principales de daño

El tránsito acumulado genera dos tipos clave de deterioro en pavimentos flexibles: fatiga en la mezcla asfáltica (fisuración por tensiones tensiles repetidas) y deformación permanente o ahuellamiento en capas base o subrasante bajo carga vertical repetida. En el predominio del tráfico pesado, la fatiga se manifiesta como “fisuración piel de cocodrilo” y el rutting produce depresiones longitudinales en las huellas de rodadura. Estos mecanismos están fundamentados en estudios SHRP y en literatura como Huang y Montejó, que combinan teoría elástica con datos de campo.

La evaluación de estos efectos complementa los cálculos de ESALs. El modelo mecanicista permite estimar deformaciones horizontales (fatiga) y verticales (rutting) mediante análisis multicapa (KENLAYER, EverStressFE) basado en tensiones críticas en niveles estructurales. Este enfoque mejora la predicción de vida útil frente al método empírico puro.

2.4.2 Fatiga: cálculo de vida útil por S-N

La vida por fatiga se calcula con la curva tensión-repeticiones del tipo S-N:

$$N_f = k_1 \cdot (\epsilon t)^{-k_2} \cdot (E)^{-k_3}$$

Donde N_f es número de pasadas hasta fisura, ϵt tensión unitaria de tracción en base de mezcla, y E módulo dinámico. Los coeficientes k_i se obtienen de pruebas de laboratorio calibrado según modelos SHRP y MEPDG.

Ejemplo práctico:

- $\epsilon t = 150 \mu\epsilon$
- $E = 5000 \text{ MPa}$
- Coeficientes estándar: $k_1=10^{11}$, $k_2 = 4.0$, $k_3 = 1.5$

$$N_f = 10^{11} \cdot (150)^{-4.0} \cdot (5000)^{-1.5} = 5.58 \times 10^{21} \text{ ciclos}$$

Con ESALs proyectados, se estima si la fatiga terminal será alcanzada durante la vida de diseño.

2.4.3 Deformación permanente: análisis de rutting

El rut depth o ahuellamiento estructural se relaciona con la acumulación de deformación bajo carga. Según modelos del Asphalt Institute, cuando la tensión vertical en la superficie del subrasante (ϵ_v) permanece bajo el límite admisible, el ahuellamiento se controla. El número de ciclos hasta falla N_p se estima por:

$$N_p = C \cdot (\epsilon_v)^{-m}$$

Donde C y m son constantes empíricas. El umbral de falla estructural suele considerarse ahuellamiento de 13–19 mm.

Una mezcla con módulo alto y buena gradación granulométrica reduce la deformación. También la presencia de bases estabilizadas o geotextiles mejora significativamente la resistencia al rutting.

2.4.4 Interrelación entre fatiga y rutting

En pavimentos flexibles, los mecanismos de fatiga y deformación permanente pueden actuar simultáneamente. La fatiga puede comenzar primero, debilitando la capa de rodadura, luego facilitando el aflojamiento y ahuellamiento. Un diseño adecuado debe equilibrar la resistencia a ambos modos considerando propiedades de mezcla, módulo resiliente y anticipando el tipo de falla predominante según el régimen de tráfico y clima local.

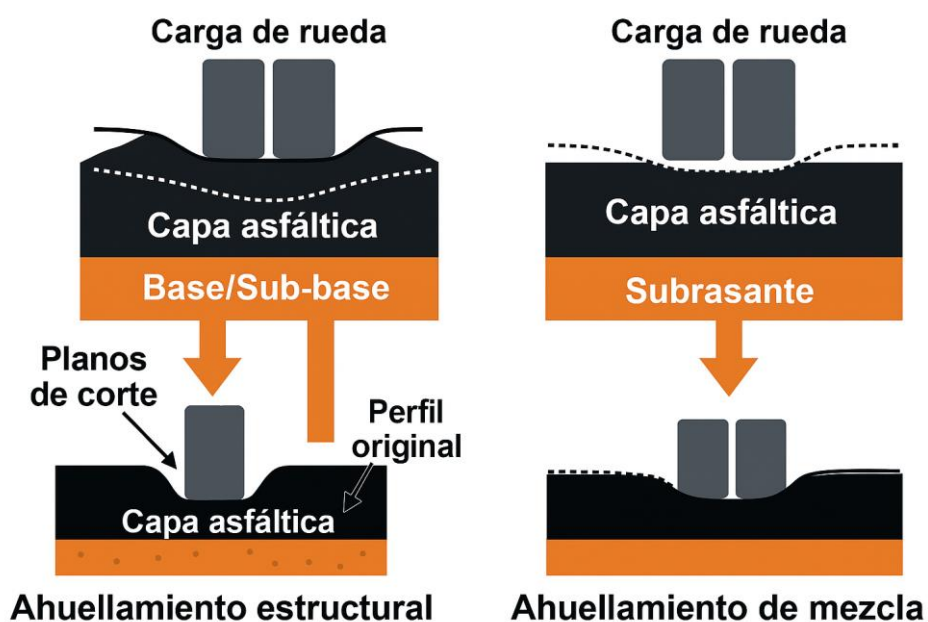
Por ejemplo, en climas cálidos, el calentamiento intensifica la fluencia asfáltica, favoreciendo rutting antes que fatiga; mientras que, en clima frío, la tensión por retracción puede acelerar fisuración por fatiga. Por ello, el diseño mecanicista permite simular ambos mecanismos y optimizar los espesores capa por capa.

2.4.5 Control y monitoreo para conservación

La evaluación periódica mediante FWD y análisis de deflexión permite calibrar modelos mecanicistas con datos reales, comparando las predicciones con condiciones actuales. Junto con el índice PCI, se puede estimar cuánto daño ha sido acumulado y cuánto margen de vida útil existe.

Una práctica efectiva es usar monitoreo de rut depth y agrietamiento por fatiga para activar intervenciones de mantenimiento preventivo o rehabilitación temprana antes de que se alcancen umbrales críticos, reduciendo costos de ciclo de vida y prolongando la operatividad de la vía.

Figura 2-3: Tipos de rutting estructural y de mezcla



Nota. La figura ilustra la deformación en base o subrasante (rutting estructural) y ahuellamiento en mezcla asfáltica, con esquemas de carga repetida.

2.5 Consideraciones especiales en vías urbanas y rurales

El diseño de pavimentos no solo depende del tránsito proyectado y de los factores equivalentes de carga, sino también de condiciones específicas del entorno urbano o rural. La diferencia en tipología vehicular, características geométricas, condiciones de drenaje, presencia de servicios públicos y estrategias de mantenimiento obliga a realizar ajustes en los cálculos estructurales y funcionales.

A continuación, se presentan cinco aspectos que diferencian el comportamiento y diseño de pavimentos en zonas urbanas y rurales, integrando conceptos de tránsito acumulado, solicitudes repetitivas y gestión del ciclo de vida.

2.5.1 Tipología y variabilidad del tránsito según entorno

El tránsito urbano se caracteriza por una alta heterogeneidad vehicular, incluyendo automóviles ligeros, buses de transporte público, motocicletas, bicicletas y vehículos de reparto de carga. Aunque el porcentaje de vehículos pesados puede ser bajo (5–15 %), su frecuencia de frenado y arranque aumenta la sollicitación dinámica y el desgaste de la capa de rodadura, especialmente en intersecciones y curvas cerradas.

En contraste, el tránsito rural está dominado por camiones pesados, tráileres y transporte agrícola, con flujos más constantes y velocidades mayores. Esto genera cargas por eje más uniformes, pero con mayor impacto acumulativo sobre la subrasante y riesgo de fatiga estructural.

Tabla 2-3: *Características comparativas de tránsito urbano y rural*

Característica	Urbano	Rural
Tipos de vehículo	Ligeros, buses, reparto	Camiones, tráileres
Velocidad típica	30–60 km/h	60–110 km/h
Frecuencia de frenado	Alta	Baja
Porcentaje de pesados	5–15 %	15–40 %
Tipo de falla frecuente	Ahullamiento superficial	Fatiga y deformación base

Nota: Datos adaptados de FHWA (2020) y Montejo Fonseca (3ra ed.).

2.5.2 Influencia de la geometría y del entorno urbano

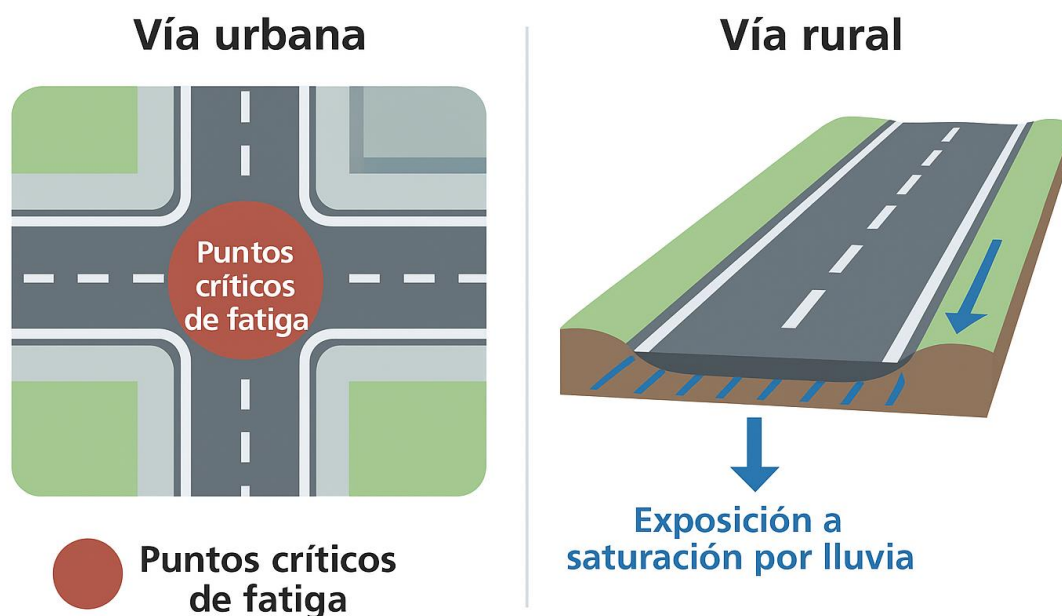
En las vías urbanas, la geometría presenta múltiples elementos que afectan el diseño estructural:

- Intersecciones y glorietas, donde la velocidad de operación disminuye, aumentando las cargas dinámicas concentradas.
- Rampas, paradas de bus y zonas de carga, donde el tránsito pesado detiene su marcha, generando fatiga localizada.
- Drenaje limitado debido a presencia de aceras, bordillos y redes de servicios subterráneos, que incrementan la vulnerabilidad a la humedad.

El diseño urbano debe incluir capas de rodadura resistentes al ahuellamiento, buena impermeabilización y, en muchos casos, concretos hidráulicos en carriles de frenado o bus para prolongar la vida útil.

En cambio, las vías rurales tienen geometría más simple, con mayor exposición a la intemperie. Aquí la prioridad es un buen drenaje superficial y subterráneo, evitando saturación de la subrasante que reduce su módulo resiliente y acelera el rutting estructural.

Figura 2-4: *Diferencias geométricas críticas entre vías urbanas y rurales*



Nota. Muestra ejemplos de intersecciones urbanas con puntos críticos de fatiga y secciones rurales expuestas a saturación por lluvia.

2.5.3 Ajustes en el cálculo de ESALs y factores de diseño

En entornos urbanos, el cálculo de ESALs debe considerar:

1. Carriles exclusivos de buses o transporte pesado, que concentran el tránsito crítico.
2. Reducción de factor de direccionalidad (F_{dir}) cuando la distribución es más uniforme por la presencia de múltiples accesos.
3. Penalización por arranques y frenados, aplicando factores de impacto dinámico (FID) recomendados por FHWA, que incrementan hasta 10–15 % los ESALs equivalentes en zonas de detención frecuente.

En vías rurales, los ESALs se concentran en un solo carril de diseño, donde:

- $F_{dir} = 0.5$
- $F_{carril} = 0.9$
- Se aplican tasas de crecimiento mayores (4–6 % anual) para contemplar la expansión agrícola o logística.

Ejemplo práctico:

Si una carretera rural proyecta $ESAL_{total} = 5 \times 10^6$ a 10 años, pero el flujo de camiones se triplica en cosecha, debe aplicarse un factor estacional (F_e) para no subdimensionar el pavimento.

Tabla 2-4: Factores de ajuste recomendados

Entorno	F_{dir}	F_{carril}	FID (%)	Factor estacional
Urbano	0.45	0.80	1.10	1.00
Rural	0.50	0.90	1.00	1.15

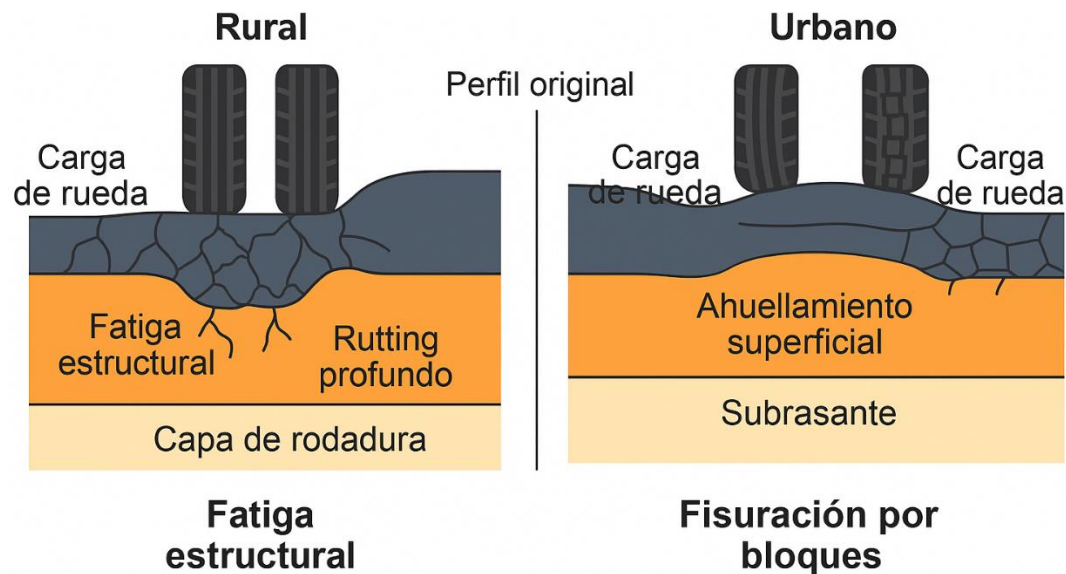
2.5.4 Tipología de fallas predominantes

Las fallas en pavimentos presentan un comportamiento diferencial:

- En zonas urbanas predominan:
 - Ahullamientos superficiales por efecto de paradas frecuentes de buses.
 - Fisuración por bloque asociada a envejecimiento del asfalto y variación térmica.
 - Exudación y pulimento superficial por bajas velocidades y contaminación ambiental.
- En zonas rurales son más frecuentes:
 - Fisuración por fatiga tipo “piel de cocodrilo” en carril de rodadura.
 - Ahuellamiento profundo por saturación de subrasante.

- Desprendimientos laterales por erosión en bermas y cunetas deficientes.

Figura 2-5: Tipología de fallas urbanas y rurales



Nota: Esquema comparativo de fallas por fatiga y rutting profundo (rural) versus ahuellamiento superficial y fisuración por bloque (urbano).

2.5.5 Estrategias de diseño y mantenimiento diferenciadas

El diseño de pavimentos debe adaptarse al entorno:

- **Estrategias urbanas**

- Pavimentos flexibles con mezclas SMA o modificadas con polímeros para alta resistencia al ahuellamiento.
- Concreto hidráulico en carriles de bus y zonas de carga.
- Mantenimiento rutinario frecuente para preservar la estética y seguridad.

- **Estrategias rurales**

- Pavimentos flexibles con bases estabilizadas o geotextiles para controlar deformación permanente.
- Priorización del drenaje subterráneo y cunetas.
- Mantenimiento preventivo programado basado en ESALs acumulados y mediciones de deflexión.

Tabla 2-5: Comparativa de estrategias de diseño urbano y rural

Aspecto	Urbano	Rural
Mezcla	SMA / Modificada	Densa o estabilizada
Material rígido	Carriles de bus o zonas de carga	Opcional en puentes o cruces
Mantenimiento	Rutinario y frecuente	Preventivo y por ciclos ESAL

2.6 Definición y relevancia del carril de diseño

El carril de diseño es aquel en el que se concentra el mayor flujo de tránsito pesado, por lo que recibe el mayor número de solicitudes equivalentes durante la vida útil de la vía. La correcta selección de este carril es fundamental, ya que el dimensionamiento estructural del pavimento se basa en el número de ESALs acumulados que transitan por él.

En autopistas de varios carriles, el carril derecho o externo suele ser el crítico porque concentra la mayor parte de los vehículos pesados. En cambio, en vías rurales de un solo carril por sentido, ese carril único es automáticamente el carril de diseño. Este criterio se ajusta siguiendo las recomendaciones de AASHTO, MEPDG y NEVI-12, garantizando que la sección de pavimento cumpla con la vida de diseño estructural sin sobredimensionar el resto de los carriles.

2.6.1 Factores de distribución del tránsito por carril

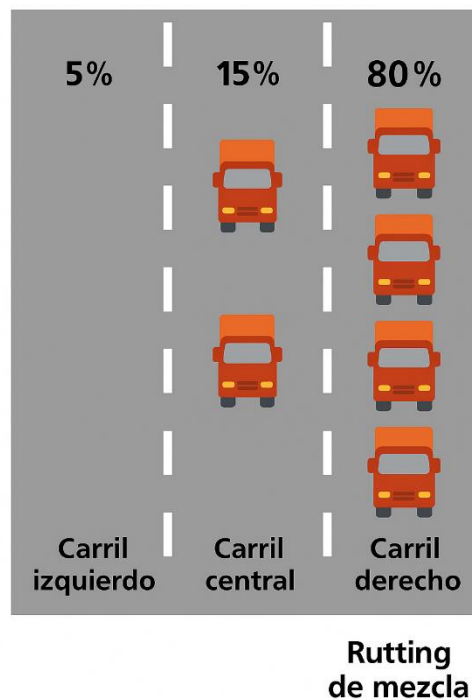
La selección del carril de diseño depende de cómo se distribuye el tránsito pesado entre los carriles. Para cuantificarlo se usan los factores de distribución de carril (F_{carril}), que representan el porcentaje de camiones que usan el carril crítico.

Tabla 2-6: Factores de distribución típicos según tipo de vía

Tipo de vía	Nº carriles/sentido	F_{carril} (NEVI-12)
Rural 1 carril/sentido	1	0.90
Rural 2 carriles/sentido	2	0.80
Autopista urbana 3 carriles	3	0.60
Autopista urbana 4 carriles	4	0.45

Nota. El F_{carril} disminuye a medida que aumentan los carriles, porque el tránsito pesado se reparte.

Figura 2-6: Distribución típica de camiones por carril



Nota. Muestra la concentración de vehículos pesados en carril derecho y la reducción progresiva hacia el izquierdo.

2.6.2 Procedimiento para seleccionar el carril de diseño

El procedimiento general para seleccionar el carril de diseño integra los conceptos de 2.1 a 2.5:

1. Clasificación del tránsito por tipo de eje (2.1)
2. Cálculo de ESAL diarios y ajustados (2.2)
3. Aplicación de FCE y factores direccionales (2.3)
4. Determinación de solicitudes acumuladas y proyección a la vida útil (2.4)
5. Identificación del carril crítico según F_{carril} y flujo de tránsito pesado (2.5)

Fórmula general para ESAL del carril de diseño:

$$ESAL_{\text{carril}} = ESAL_{\text{total}} \times F_{\text{dir}} \times F_{\text{carril}}$$

Donde:

- $ESAL_{\text{total}}$ = Ejes equivalentes diarios $\times 365 \times \text{FGA}$
- F_{dir} = Factor de direccionalidad
- F_{carril} = Factor de distribución de carril

2.6.3 Ejemplo aplicado de selección del carril de diseño

Supongamos una autopista urbana de 3 carriles por sentido con:

- $ESAL_{total} \text{ proyectado} = 8 \times 10^6$ en 10 años
- $F_{dir} = 0.5$
- $F_{carril} (\text{derecho}) = 0.60$

Cálculo:

$$ESAL_{carril} = 8 \times 10^6 \times 0.5 \times 0.60 = 2.4 \times 10^6$$

Esto significa que el pavimento debe diseñarse para 2.4 millones de ESALs en el carril crítico. Los demás carriles no requieren igual espesor si se aplican estrategias de diseño diferenciado, como propone la MEPDG.

Tabla 2-7: Comparación de ESAL por carril

Carril	Factor aplicado	ESAL de diseño
Derecho	0.5×0.60	2.4×10^6
Central	0.5×0.30	1.2×10^6
Izquierdo	0.5×0.10	0.4×10^6

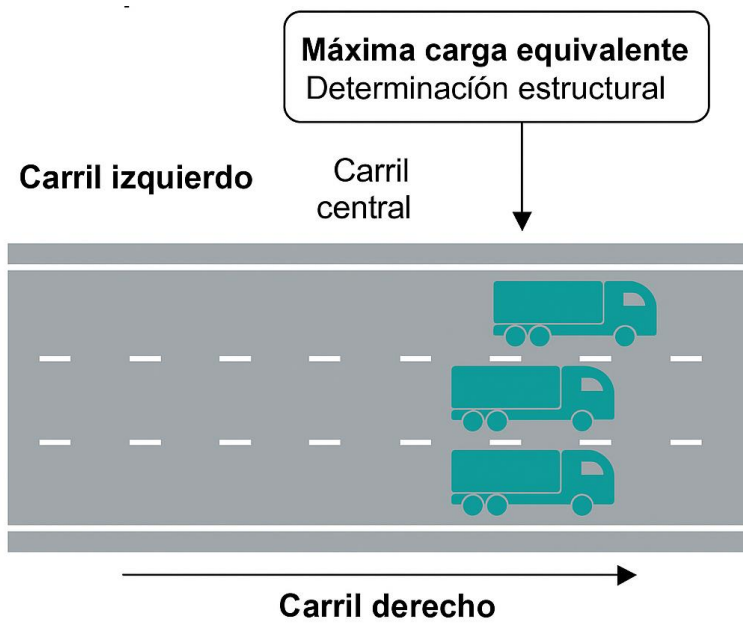
2.6.4 Implicaciones para diseño y mantenimiento

La selección adecuada del carril de diseño permite:

1. Optimizar el espesor estructural, evitando sobredimensionamiento de carriles menos solicitados.
2. Programar mantenimiento focalizado, priorizando el carril derecho de autopistas o el carril único en vías rurales.
3. Reducir costos de ciclo de vida, ya que la rehabilitación se enfoca donde el pavimento consume su vida útil más rápido.

Normas como NEVI-12 y MEPDG sugieren que, en proyectos de alta demanda, se consideren pavimentos de refuerzo parcial o capas diferenciadas para carriles secundarios. En el caso de vías urbanas con carriles exclusivos de buses, este análisis es crítico para evitar ahuellamiento prematuro.

Figura 2-7: Selección del carril de diseño en autopistas



Nota: Representa un esquema donde el carril derecho recibe la mayor carga equivalente, marcando el diseño estructural.

Capítulo 3. Caracterización de Subrasantes y Procesamiento del CBR

3.1 Rol estructural de la subrasante y parámetros resistentes

La subrasante constituye la capa de soporte natural o mejorada sobre la cual se construyen las capas del pavimento. Su capacidad portante determina la magnitud de esfuerzos y deformaciones que se transmiten hacia el terreno. En diseño estructural, la subrasante actúa como fundación, distribuyendo cargas hacia el suelo natural y condicionando el espesor de las capas superiores. Una subrasante con baja capacidad mecánica requiere espesores mayores o mejoras geotécnicas para garantizar la vida útil del pavimento.

El desempeño estructural de la subrasante se evalúa con parámetros resistentes que cuantifican su respuesta ante cargas repetidas, entre ellos:

1. Índice CBR (California Bearing Ratio)
2. Módulo resiliente, (M_r) (respuesta elástica recuperable bajo carga repetida).
3. Módulo de reacción k (para pavimentos rígidos)
4. Resistencia al corte no drenado (S_u) en suelos cohesivos (apoyo al diseño y a la mejora/estabilización).

Estos parámetros permiten relacionar la respuesta del suelo ante cargas repetidas con los ESALs proyectados y con las solicitaciones acumuladas (véase Cap. 2).

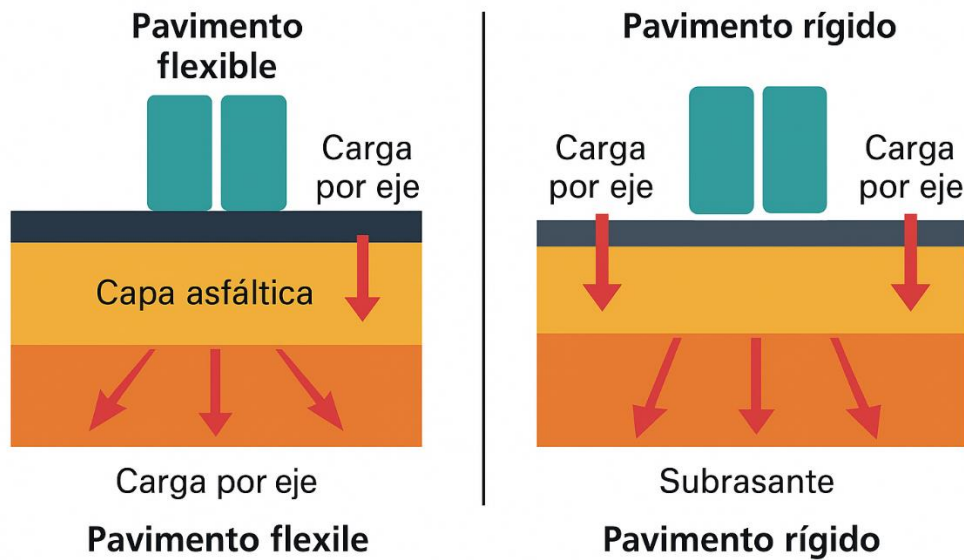
3.1.1 Función estructural de la subrasante

La subrasante es la base estructural del sistema de pavimento. Su función es:

- Soportar cargas transmitidas por ejes equivalentes.
- Evitar asentamientos diferenciales que generen ahuellamiento o fisuración.
- Mantener estabilidad frente a ciclos de humedad y temperatura.

En pavimentos flexibles, cualquier deformación permanente de la subrasante se refleja en superficie. En pavimentos rígidos, la losa distribuye mejor las cargas; sin embargo, una subrasante débil puede producir pumping y rotura de losas.

Figura 3-1: Función estructural de la subrasante en pavimentos flexibles y rígidos



Nota. Muestra cómo las cargas por eje se distribuyen hacia el suelo natural, destacando la importancia del soporte uniforme.

3.1.2 Parámetros resistentes de diseño

El CBR es el parámetro más difundido en el enfoque empírico; valores bajos (p. ej., $CBR < 5\%$) indican subrasantes débiles que exigen refuerzos o estabilización.

En metodologías mecanicistas-empíricas se emplea el módulo resiliente M_r y, para pavimentos rígidos, el módulo de reacción k . AASHTO-93 y NEVI-12 permiten correlacionar $CBR \rightarrow M_r$ mediante expresiones por tramos (normativas), posibilitando la integración de ambos enfoques.

Para pavimentos rígidos, se utiliza el módulo de reacción k , medido con placa de carga, que refleja la rigidez del sistema suelo-cimentación.

Ecuaciones normativas AASHTO-93 para M_r en función del CBR:

(unidades base en **psi**; el CBR se introduce en %)

$$M_r(psi) = \begin{cases} 1500 \cdot CBR, & \text{si } CBR \leq 7.2 \\ 3000 \cdot CBR^{0.65}, & \text{si } 7.2 < CBR \leq 20 \\ 4326 \cdot \ln(CBR) + 241, & \text{si } CBR > 20 \end{cases}$$

Para convertir a unidades internacionales se aplica el factor exacto:

$$1psi = 0.00689476MPa$$

De esta forma, por ejemplo:

- Para $CBR = 4\%$, $M_r = 6000 psi = 41.3685 MPa$.

- Para CBR = 10 %, $M_r = 13400.51 \text{ psi} = 92.3932 \text{ MPa}$.
- Para CBR = 30 %, $M_r = 14938.17 \text{ psi} = 103.0341 \text{ MPa}$.

El módulo de reacción k no debe obtenerse por simplificaciones del tipo $k \approx M_r/19.4$, sino que debe determinarse mediante el ensayo de placa de carga o a través de correlaciones específicas presentadas en la sección 3.6 Correlación CBR– k .

En conclusión, estos parámetros definen el espesor de la base y subbase necesarios para evitar fallas prematuras, garantizando que el diseño estructural sea coherente con la capacidad real de soporte del terreno.

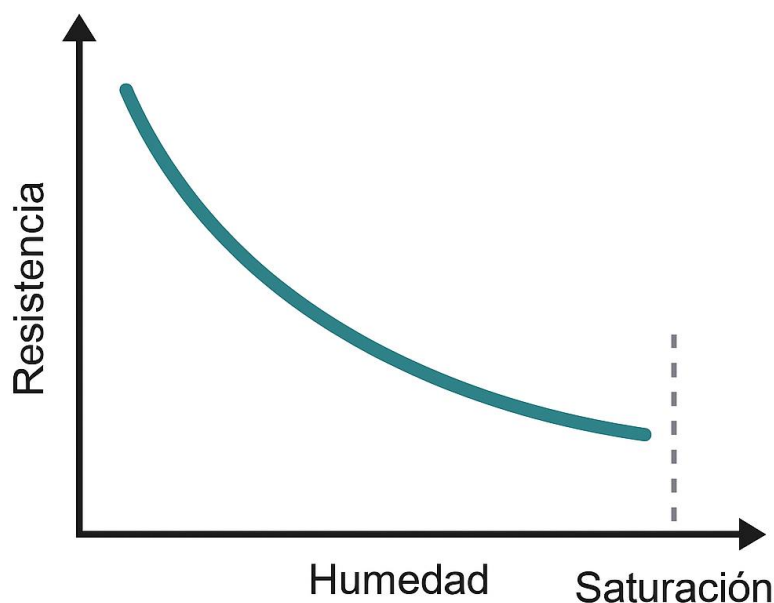
3.1.3 Influencia de humedad y condiciones ambientales

La humedad es uno de los factores más determinantes en la variación de la resistencia de la subrasante. Un suelo cohesivo al alcanzar la saturación puede perder hasta un 50 % de su capacidad portante, lo que impacta directamente en el valor de CBR y en el módulo resiliente M_r . Por esta razón, la caracterización debe incorporar:

- Nivel freático y riesgo de capilaridad, que condicionan la humedad permanente en capas inferiores.
- Coeficiente de drenaje (m_d), utilizado en el diseño estructural AASHTO-93 para ajustar los coeficientes de capa.
- Variaciones estacionales de humedad y temperatura, que afectan el desempeño a lo largo de la vida útil del pavimento.

En zonas tropicales o costeras, con alta precipitación, se recomienda prever sistemas de drenaje eficientes (subdrenes, filtros y geotextiles) y considerar estabilización química (cal, cemento, cenizas volátiles). En zonas áridas, la contracción por desecación puede inducir fisuración por retracción que se refleja en la superficie, especialmente en pavimentos rígidos.

Figura 3-2: Efecto de la humedad en la capacidad portante de la subrasante



Nota. La figura ilustra cómo la resistencia disminuye al acercarse a la saturación.

3.1.4 Clasificación de suelos para fines viales

La clasificación de la subrasante permite anticipar su comportamiento estructural y orientar la decisión de diseño. Los sistemas más empleados en ingeniería vial son:

- AASHTO (A-1 a A-7), incorpora el Índice de Grupo (IG) como indicador cuantitativo de calidad vial.
- USCS (Unified Soil Classification System): útil para caracterizar textura, plasticidad y potencial de expansividad.

. De manera general:

- Un suelo A-1-a o GW (grava bien graduada) presenta excelente soporte estructural, con valores de CBR altos y bajo índice de grupo.
- Un suelo A-3 o SP (arena mal graduada) ofrece soporte aceptable, aunque es sensible a variaciones de densidad.
- Los suelos A-6 o CL (arcilla de baja plasticidad) muestran soporte medio, con sensibilidad alta a cambios de humedad.
- Los suelos A-7-6 o CH (arcilla de alta plasticidad) corresponden a subrasantes débiles que requieren obligatoriamente mejoramiento o estabilización.

Figura 3-3: Relación entre clasificación de suelo y comportamiento estructural

Clasificación	IG/AASHTO	USCS	Comportamiento típico
A-1-a	0	GW	Excelente soporte, granular bien graduado
A-3	0	SP	Bueno, pero sensible a densificación
A-6	5–20	CL	Soporte medio, afectado por humedad
A-7-6	>20	CH	Débil, alta plasticidad, requiere mejora

3.1.5 Ejemplo práctico de caracterización y diseño inicial

Se evalúa una subrasante de vía rural con:

- $CBR = 5 \%$
- Tipo de suelo = A-7-6 (CH)

1. Cálculo del módulo resiliente (M_r)

Como $CBR \leq 7.2$, se aplica la primera expresión de AASHTO-93:

$$M_r = 1500 \cdot CBR = 1500 \cdot 5 = 7500 \text{ psi}$$

Conversión a MPa:

$$M_r = 7500 \cdot 0.006894757293168 = 51.71067969876 \text{ MPa}$$

$$\text{Resultado: } M_r = 7500 \text{ psi} = 51.711 \text{ MPa}$$

2. Implicaciones estructurales según NEVI-12:

- Pavimento flexible: para un tránsito T2 y subrasante débil (A-7-6, $CBR = 5 \%$), se requiere $SN \geq 3.5$, lo que corresponde a un espesor total $\geq 45 \text{ cm}$.
- Pavimento rígido: la NEVI-12 recomienda losa de $\geq 20 \text{ cm}$ apoyada en base granular o estabilizada.

Tabla 3-1: Ejemplo de diseño inicial según CBR

Tipo de pavimento	CBR	M_r (MPa)	Espesor mínimo recomendado
Flexible	5 %	51.711	45 cm
Rígido	5 %	51.711	20 cm

Este ejercicio demuestra cómo la caracterización de la subrasante mediante el CBR permite obtener parámetros equivalentes (Mr), que constituyen la base tanto para el diseño empírico (CBR, SN) como para el diseño mecanicista (Mr).

3.1.6 Implicaciones en el diseño estructural

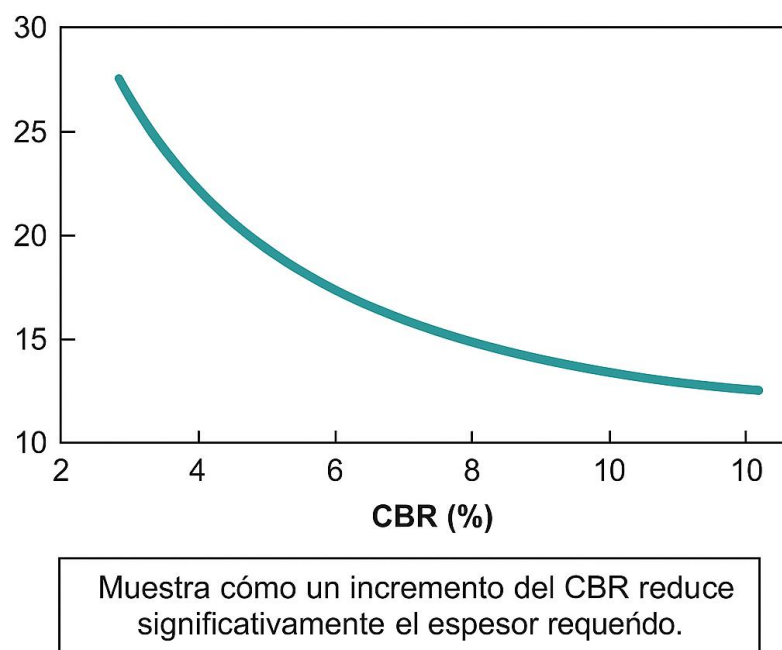
El espesor de las capas superiores del pavimento depende directamente de la resistencia de la subrasante. Una subrasante blanda incrementa el Número Estructural (SN) requerido en pavimentos flexibles y, en pavimentos rígidos, condiciona el espesor de losas y la necesidad de capas de apoyo estabilizadas para evitar fenómenos como el bombeo o la pérdida de soporte.

Las normas AASHTO-93 y NEVI-12 establecen espesores mínimos normativos en función del CBR o del módulo resiliente Mr . En cambio, los métodos mecanicistas-empíricos más avanzados (como la MEPDG) utilizan modelos multicapa elásticos para estimar deflexiones, tensiones y deformaciones acumuladas en cada capa del sistema estructural.

Una caracterización precisa de la subrasante permite:

- Evitar sobredimensionamientos, que encarecen el proyecto.
- Prevenir fallas prematuras, asociadas a un diseño que subestima la debilidad del suelo.
- Fundamentar proyectos de mejoramiento o estabilización, que se desarrollarán en el Epígrafe 3.5.

Figura 3-4: Influencia del CBR en el espesor del pavimento flexible



Nota. Muestra cómo un incremento del CBR reduce significativamente el espesor requerido.

3.2 Muestreo, ensayos de campo y laboratorio

La caracterización confiable de la subrasante exige obtener muestras representativas del suelo y ejecutar ensayos tanto in situ como de laboratorio. Estos resultados permiten determinar la capacidad portante, el comportamiento bajo cargas repetidas y la variabilidad espacial, insumos fundamentales para el diseño de pavimentos conforme a AASHTO-93, NEVI-12 y metodologías MEPDG.

Los procedimientos de muestreo y ensayo buscan minimizar la incertidumbre geotécnica, considerando:

- La heterogeneidad natural de los suelos.
- La influencia del nivel freático y la capilaridad.
- Las condiciones estacionales de humedad y temperatura, que afectan la respuesta del terreno.

En los apartados siguientes se detallan los principales aspectos técnicos que estructuran esta fase de caracterización.

3.2.1 Estrategia de muestreo en campo

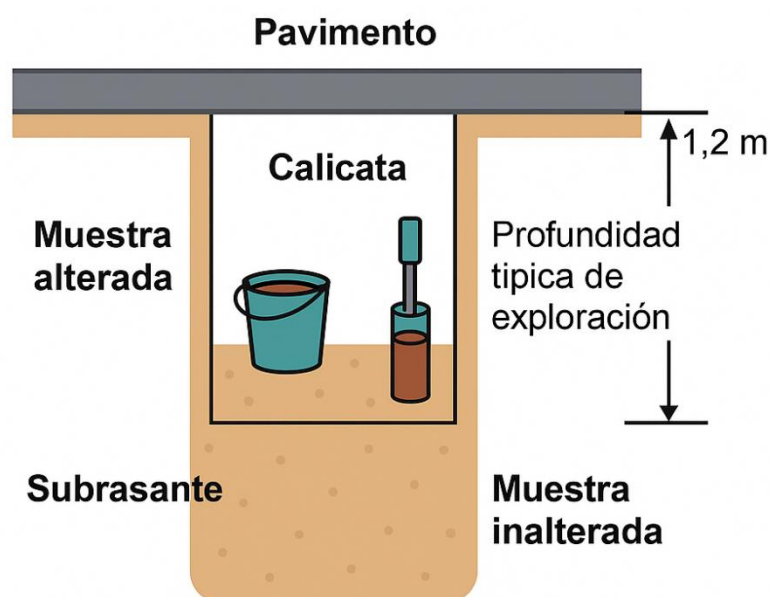
El muestreo representativo es esencial para identificar la variación espacial de las propiedades de la subrasante. Para proyectos viales, se recomienda:

- Calicatas cada 200–500 m en vías rurales, y cada 100–200 m en áreas urbanas, considerando la heterogeneidad del terreno.
- Sondeos SPT (Standard Penetration Test) o CPT (Cone Penetration Test) en tramos donde se sospechen capas blandas profundas o suelos con comportamiento no uniforme.
- Registro sistemático de nivel freático, color, textura y condiciones ambientales, para correlacionar con las clasificaciones AASHTO (A-1 a A-7) y USCS (GW, CL, CH, etc.).

Se deben obtener:

- Muestras alteradas, para ensayos de granulometría, límites de Atterberg y clasificación.
- Muestras inalteradas, para ensayos de CBR, compresión simple y determinación de módulo resiliente (M_r).

Figura 3-5: Esquema de calicatas y toma de muestras de subrasante



Nota. La figura muestra la profundidad típica de exploración y métodos de extracción de muestras alteradas e inalteradas.

3.2.2 Ensayos de campo para caracterización rápida

Los ensayos in situ permiten obtener datos preliminares de resistencia y deformabilidad, útiles para diagnóstico y control:

- Granulometría y límites de Atterberg (ASTM D422, ASTM D4318): definen la clasificación AASHTO/USCS.
- CBR en laboratorio (ASTM D1883): con diferentes energías de compactación (Proctor estándar y modificado) y bajo distintas condiciones de humedad, para obtener valores de diseño.
- Ensayo triaxial cíclico (AASHTO T-307): determina directamente el módulo resiliente (M_r), parámetro fundamental en el diseño mecanicista-empírico.
- Compresión simple no confinada (ASTM D2166): aplicable en suelos cohesivos, útil para estimar resistencia al corte no drenado (S_u).

Tabla 3-2: Ensayos de campo más comunes

Ensayo	Parámetro obtenido	Aplicación principal
DCP	CBR estimado	Control y diagnóstico rápido
Placa de carga	Módulo k	Diseño de pavimentos rígidos

FWD	Deflexiones / M_r	Auditorías y backcalculation
Penetrómetro	CBR in situ	Diseño empírico inicial

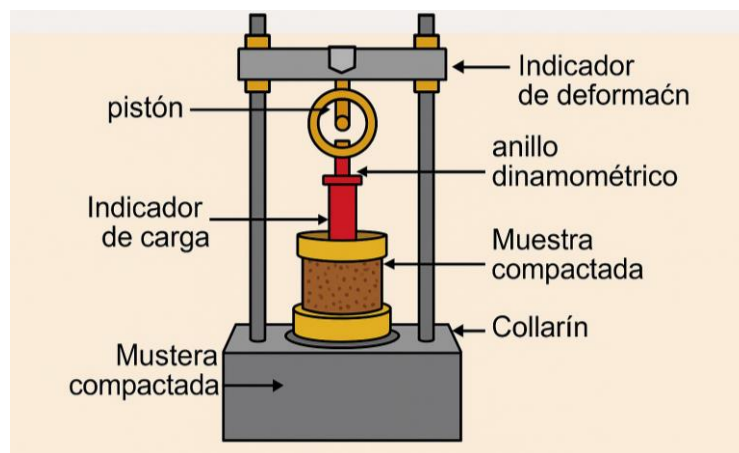
Nota: Los ensayos de campo permiten validar la variabilidad geotécnica antes de definir el número de muestras de laboratorio.

3.2.3 Ensayos de laboratorio para diseño estructural

Los ensayos de laboratorio complementan los datos obtenidos en campo, permitiendo un análisis más detallado de la capacidad estructural del suelo:

- Granulometría y límites de Atterberg (ASTM D422, ASTM D4318): definen la clasificación AASHTO/USCS.
- CBR en laboratorio (ASTM D1883): con diferentes energías de compactación (Proctor estándar y modificado) y bajo distintas condiciones de humedad, para obtener valores de diseño.
- Ensayo triaxial cíclico (AASHTO T-307): determina directamente el módulo resiliente (M_r), parámetro fundamental en el diseño mecanicista-empírico.
- Compresión simple no confinada (ASTM D2166): aplicable en suelos cohesivos, útil para estimar resistencia al corte no drenada (S_u).

Figura 3-6: Ensayo de CBR en laboratorio



Nota: Se observa el pistón penetrando en una muestra compactada, lo que permite estimar la capacidad portante relativa de la subrasante.

3.2.4 Procesamiento e interpretación de resultados

Los resultados de campo y laboratorio se integran para:

1. Determinar el valor representativo de CBR y su variación estadística.

2. Calcular el módulo resiliente M_r (base para métodos mecanicista-empíricos).
3. Clasificar el suelo según AASHTO y NEVI-12.
4. Definir tramos homogéneos de diseño, separando sectores que requieren refuerzo o estabilización.

3.2.5 Ejemplo práctico de caracterización completa

Se realiza el muestreo de una carretera rural de 5 km:

- Calicatas cada 250 m $\rightarrow$ 20 calicatas
- CBR promedio = 7 %, mínimo 5 %
- DCP confirma CBR en el rango 6–8 %

1. Cálculo M_r (AASHTO-93)

$$CBR = 5 \% (\leq 7.2): M_r = 1500 \cdot 5 = 7500 \text{ psi} = 51.711 \text{ MPa}$$

$$CBR = 6 \% (\leq 7.2): M_r = 1500 \cdot 6 = 9000 \text{ psi} = 62.053 \text{ MPa}$$

$$CBR = 7 \% (\leq 7.2): M_r = 1500 \cdot 7 = 10500 \text{ psi} = 72.395 \text{ MPa}$$

$$CBR = 8 \% (7.2 - 20): M_r = 3000 \cdot 8^{0.65} = 11591.236 \text{ psi} = 79.919 \text{ MPa}$$

Promedio de diseño: con $CBR = 7 \%$, $M_r = 10500 \text{ psi} = 72.395 \text{ MPa}$

2. Implicación para el diseño:

- **Flexible:** el M_r calculado se emplea en el dimensionamiento (SN) y verificación de deformaciones/deflexiones.
- **Rígido:** M_r apoya la determinación del soporte;

Tabla 3-3: Resultados de caracterización

Caso	CBR (%)	M_r (psi)	M_r (MPa)	k preliminar (kN/m ³)
Calicata tipo 1	6.000	9000.000	62.053	300–400
Calicata tipo 2	7.000	10500.000	72.395	400–460
Calicata tipo 3	8.000	11591.236	79.919	400–460
Promedio muestral	7.000	10500.000	72.395	400–460
Diseño (IC 90 %)	6.0029	9004.371	62.083	300–400

Notas técnicas:

1. Los valores de M_r se obtienen exclusivamente con AASHTO-93 por tramos y se reportan en psi y MPa (conversión exacta).
2. Los rangos de k provienen de NEVI-12 para diseño preliminar y deben verificarse con placa de carga para diseño definitivo.
3. En los cálculos estructurales que siguen, se empleará el CBR de diseño y su M_r asociado (fila “Diseño (IC 90 %)”).

3.3 Procesamiento estadístico del índice CBR

El procesamiento estadístico del CBR permite obtener un valor representativo de diseño que refleje la capacidad portante de la subrasante con un nivel de confiabilidad predefinido, incorporando la variabilidad natural del suelo.

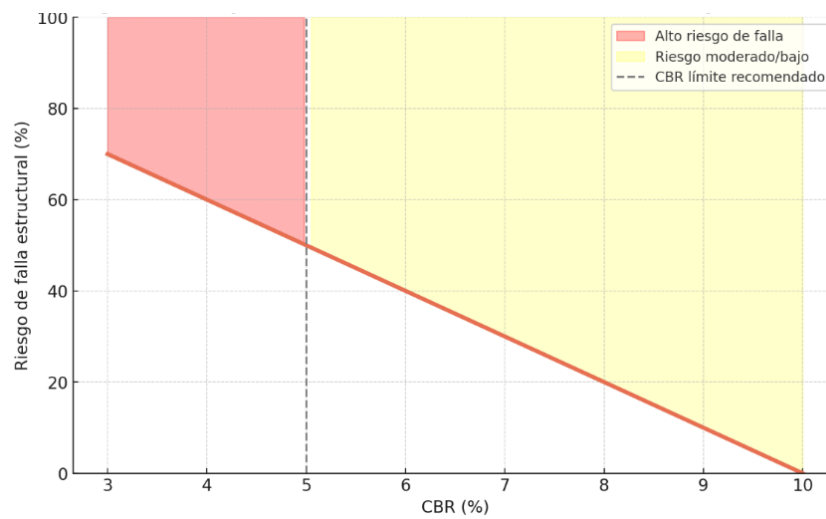
De acuerdo con AASHTO-93 y NEVI-12, no es recomendable diseñar con el CBR promedio simple, sino con un CBR de diseño ajustado estadísticamente para reducir el riesgo de falla en zonas débiles.

3.3.1 Importancia del procesamiento estadístico

El suelo de subrasante presenta variaciones espaciales y estacionales que pueden originar sectores críticos de baja resistencia. Si el dimensionamiento se basa solo en el promedio, existe riesgo de fallas prematuras en dichos sectores. El procesamiento estadístico tiene como objetivos específicos:

- Identificar valores representativos y atípicos (outliers).
- Cuantificar la dispersión (desviación estándar s , coeficiente de variación CV).
- Determinar un CBR de diseño con nivel de confianza (típicamente 90–95 %), a partir de un factor K apropiado para la confiabilidad y el tamaño muestra.

Figura 3-7: Importancia de la variabilidad en el diseño de pavimentos



Nota: Muestra cómo los valores bajos de CBR determinan el diseño y controlan el riesgo de falla estructural.

3.3.2 Estadísticos básicos de los resultados de CBR

Sea $\{x_i\}_{i=1}^n$ el conjunto de resultados de CBR (en %):

1. Media aritmética ($\bar{x}$)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

2. Desviación estándar (s)

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

3. Coeficiente de variación (CV)

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$$

Criterio de homogeneidad. Un $CV < 25\%$ suele considerarse aceptable para diseño sin refuerzos adicionales; valores superiores sugieren subdividir en tramos homogéneos o considerar mejoras.

3.3.3 Determinación del CBR de diseño

Para asegurar la confiabilidad, se utiliza un valor de CBR de diseño:

$$CBR_d = \bar{x} - K \cdot s$$

donde K es el factor asociado al nivel de confianza y al tamaño muestral.

- Cuando se adopta la aproximación normal (NEVI-12/uso práctico para $n \geq 20$) con confianza unilateral del 90 %,

$$K = Z_{0.90} = 1.2815515655446004$$

(valor del cuantil 0.90 de la $N(0,1)$ para cola superior).

- Si se prefiere el ajuste estricto por Student-t (unilateral, $n = 20 \Rightarrow v = 19$), $K = t_{0.90,19}$ (valor tabulado). *(Este valor se cita normalmente en tablas; si se adopta, debe usarse en sustitución de $Z_{0.90}$.)*

Nota de criterio: para consistencia y reproducibilidad, en este tomo se adopta $K = Z_{0.90}$ (90 % unilateral) cuando $n \geq 20$, salvo que el lector opte explícitamente por Student-t. A continuación, se muestran ambos resultados para que se pueda ilustrar la diferencia metodológica.

Ejemplo práctico con los datos de la Tabla 3.2.2:

Resultados de CBR (20 calicatas en 5 km, cada 250 m):

- **Número de muestras:** $n = 20$
- **CBR promedio:** $\bar{x} = 6.9\%$
- **Desviación estándar:** $s = 0.7\%$

Cálculo del coeficiente de variación:

$$CV = 0.76.9 \times 100 = 10.15 \%$$

CBR de diseño con $K = Z_{0.90} = 1.28$:

$$\begin{aligned} CBR_d &= \bar{x} - K \cdot s \\ &= 6.9 - (1.2815515655446004) \times 0.7 \\ &= 6.9 - 0.8970860958812203 \\ &= 6.003 \% \end{aligned}$$

(Opcional) CBR de diseño con $K = t_{0.90,19}$ *(sólo si se decide usar Student-t)*:

$$CBR_d^{(t)} = 6.9 - (t_{0.90,19}) \cdot 0.7$$

Cuando se emplea una tabla estándar $t_{0.90,19} \approx 1.328$, se obtiene $CBR_d^{(t)} = 6.9 - 1.328 \times 0.7 = 5.9704 \%$.

Tabla 3-4: Procesamiento estadístico del CBR de la subrasante

Estadístico	Valor calculado
Número de muestras	20
CBR promedio	6.9 %
Desviación estándar (s)	0.7 %
Coeficiente de variación (CV)	10.145 %
CBR de diseño 90 % (normal)	6.003 %; (con $K = Z_{0.90} = 1.28$)
<i>(Opcional)</i> CBR de diseño 90 % (t)	5.9704% ; (si se adopta $t_{0.90,19} \approx 1.328$)

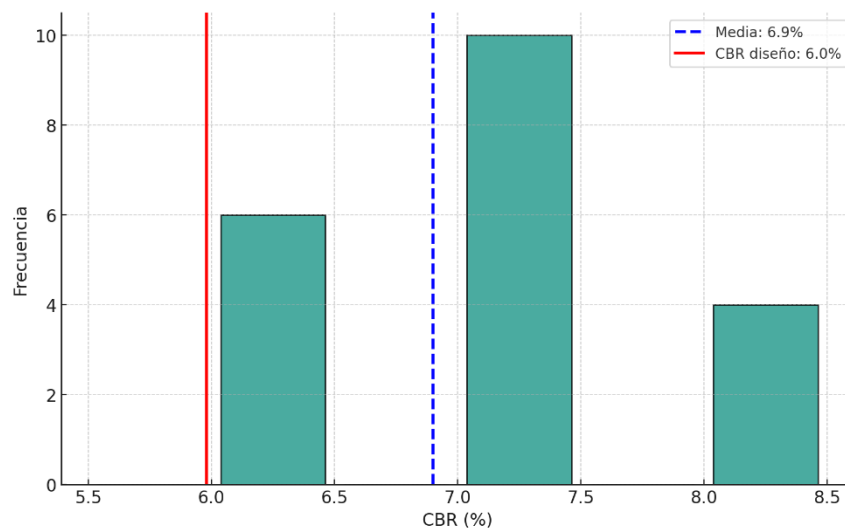
Criterio: Salvo indicación contraria, el valor oficial que se usará en los cálculos posteriores será $CBR_d = 6.003 \%$ (confianza unilateral del 90 % con aproximación normal y $n=20$). Este CBR de diseño será la base para calcular los módulos resilientes Mr (AASHTO-93) y los módulos de reacción k .

3.3.4 Implicaciones en el diseño estructural

El CBR de diseño ajustado estadísticamente presenta beneficios fundamentales en la ingeniería vial:

- Reduce la probabilidad de falla temprana, al incorporar la variabilidad natural del suelo y evitar que sectores críticos de baja resistencia condicionen el desempeño.
- Optimiza el espesor estructural, al impedir que valores aislados o atípicos conduzcan a sobredimensionamientos innecesarios.
- Facilita la integración con métodos mecanicistas, ya que puede convertirse en parámetros equivalentes de diseño: el módulo resiliente
- Mr (AASHTO-93) y, en pavimentos rígidos, el módulo de reacción k (Sección 3.6).

Figura 3-8: Diagrama de frecuencia del CBR y valor de diseño



Nota: El diagrama representa la distribución de valores de CBR, la media aritmética y el valor reducido de diseño (CBR_d) que se adopta con un nivel de confianza específico.

Con este procedimiento, el diseño estructural minimiza riesgos, garantiza seguridad y durabilidad y cumple con los lineamientos de NEVI-12 y AASHTO-93.

3.4 Uso de intervalos de confianza en ingeniería vial

El uso de intervalos de confianza (IC) en el dimensionamiento de pavimentos permite cuantificar la incertidumbre asociada a la variabilidad de la subrasante.

Diseñar con un único valor promedio puede ser riesgoso, ya que las zonas con CBR bajo tienen alta probabilidad de falla antes de lo previsto. En cambio, los intervalos de confianza aseguran que el valor adoptado para el diseño cumpla un nivel de confiabilidad predefinido, normalmente del 90 % o 95 %, según recomendaciones de AASHTO y NEVI-12.

3.4.1 Concepto de intervalo de confianza aplicado al CBR

En ingeniería vial, un intervalo de confianza (IC) es un rango de valores en el cual se espera que se ubique el CBR verdadero poblacional de la subrasante con una determinada probabilidad.

Se expresa como:

$$IC_{(1-\alpha)} = \bar{x} \pm t_{\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Donde:

- $\bar{x}$ = CBR promedio muestral.

- s = desviación estándar muestral.
- n = número de muestras.
- $t_{\alpha/2, n-1}$ = valor de la distribución t de Student para el nivel de confianza deseado

Si se toma un IC del 90 %, existe 90 % de probabilidad de que el verdadero CBR poblacional se encuentre en ese rango.

3.4.2 Determinación del CBR de diseño

Para fines de diseño estructural, se adopta como CBR de diseño el límite inferior del intervalo de confianza (IC). Este enfoque garantiza que, con la confiabilidad definida (90 % o 95 %), la mayoría de la subrasante presentará una resistencia igual o superior al valor utilizado en el dimensionamiento.

3.4.2.1 Ejemplo práctico usando los datos de la Tabla 3.4:

- Promedio $\bar{x}=6.9$ %
- Desviación estándar $s=0.72$
- Numero de muestras $n=20$
- Para un IC unilateral $t_{0.05, 19} = 1.73$ para 90 % de confianza

Cálculo del error estándar:

$$\frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.72}{\sqrt{20}} = 0.157$$

Margen de error:

$$E = t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 1.73 \cdot 0.157 = 0.27$$

Intervalo de confianza (90 %):

$$IC_{90\%} = 6.9 \pm 0.27$$

$$IC_{90\%} = [6.63, 7.17]$$

Resultado:

- Límite inferior = **6.6 %**
- Límite superior = **7.2 %**

CBR de diseño = 6.6 % (redondeado conservadoramente a 6 % para cumplir criterios de NEVI-12).

3.4.3 Integración en el diseño de pavimentos

El CBR de diseño obtenido se emplea para:

1. Definir el espesor total del pavimento en métodos empíricos AASHTO y NEVI-12.
2. Calcular el módulo resiliente Mr en métodos mecanicistas.
3. Determinar el módulo de reacción k para pavimentos rígidos (Sección 3.6, mediante ensayo de placa de carga o correlaciones específicas).

3.4.3.1 Ejemplo práctico de aplicación

Dado que $CBR_d = 6.0\%$ y $CBR \leq 7.2$, se usa la primera expresión normativa AASHTO-93:

$$Mr = 1500 \cdot CBR_d = 1500 \cdot 6 = 9000 \text{ psi}$$

Conversión exacta a MPa:

$$Mr = 9000 \cdot 0.006894757293168 = 62.053 \text{ MPa}$$

Interpretación estructural normativo

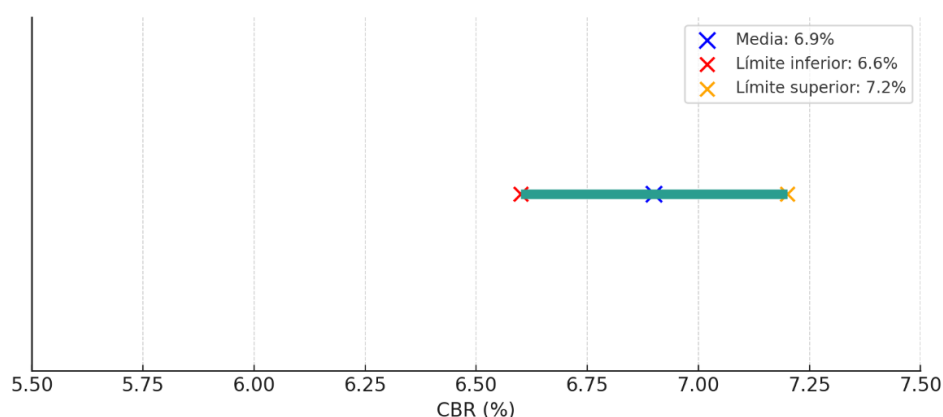
El **CBR de diseño = 6 %** representa una **subrasante de baja capacidad portante**. Según los criterios de **NEVI-12** y los **nomogramas de AASHTO-93**, para un **tránsito T2** ($ESAL \leq 10^6$) y confiabilidad $\geq 90 \%$ se recomiendan los siguientes espesores:

Tabla 3-5: Espesores referenciales según CBR y tipo de pavimento

Tipo de pavimento	CBR (%)	Tránsito (T2)	Espesor total (cm)
Flexible (asfalto + base + subbase)	6	T2	45
Rígido (losa + base granular)	6	T2	20

Nota: Valores obtenidos de NEVI-12, Vol. 3 y AASHTO 1993, para un periodo de diseño de 10-15 años y nivel de confiabilidad $\geq 90 \%$.

Figura 3-9: Relación entre CBR de diseño e intervalo de confianza



Nota: Muestra cómo el límite inferior del IC se adopta para garantizar confiabilidad estructural.

3.4.3.2 Beneficios del uso de intervalos de confianza

El empleo de intervalos de confianza (IC) en la determinación del CBR de diseño aporta ventajas técnicas y normativas fundamentales:

1. Aumenta la confiabilidad del diseño estructural, al incorporar explícitamente la variabilidad estadística de la subrasante.
2. Reduce el riesgo de fallas prematuras en tramos críticos, pues el valor adoptado corresponde al límite inferior del IC, garantizando un diseño conservador.
3. Permite justificar técnicamente los espesores adoptados en auditorías, fiscalizaciones o revisiones de proyectos, facilitando la trazabilidad del proceso de diseño.
4. Integra estadística e ingeniería geotécnica, en coherencia con la filosofía mecanicista-empírica adoptada por AASHTO-93 y los lineamientos de NEVI-12.

En auditorías viales, el uso de IC también ayuda a detectar tramos débiles que requieren refuerzo o mejora local antes de la construcción, optimizando los costos del ciclo de vida del pavimento.

3.5 Mejora y estabilización del terreno

La mejora y estabilización del terreno busca:

- Incrementar la capacidad portante de la subrasante.
- Reducir su variabilidad espacial.

- Garantizar el cumplimiento de los parámetros estructurales de diseño definidos en los epígrafes anteriores.

Este proceso resulta crítico cuando:

- El CBR de diseño es bajo ($<5\%$).
- La subrasante presenta alta plasticidad, problemas de humedad, nivel freático elevado o asentamientos diferenciales.

Las técnicas pueden ser:

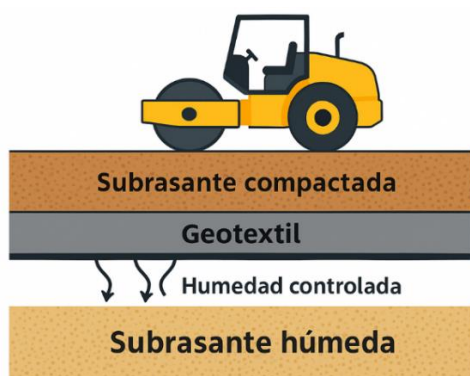
- Temporales, aplicadas durante la construcción para habilitar la plataforma de trabajo.
- Permanentes, como la estabilización química o mecánica, que modifican de forma durable las propiedades del suelo.

3.5.1 Métodos de mejora temporal

Los métodos temporales se aplican con el objetivo de habilitar la plataforma de trabajo, sin alterar de manera significativa la estructura del suelo a largo plazo. Entre ellos destacan:

- **Secado natural o artificial:** exposición solar, ventilación forzada o empleo de cal viva para disminuir la humedad.
- **Compactación en capas delgadas:** incrementa la densidad relativa, reduce vacíos y controla asentamientos iniciales.
- **Uso de geotextiles separadores:** impiden la contaminación entre materiales de diferentes granulometrías, mejoran la estabilidad inmediata y permiten el tránsito de maquinaria pesada.

Figura 3-10: Mejora temporal mediante compactación y uso de geotextil



Nota: Ilustra la técnica de preparación de subrasante con control de humedad y separación estructural.

3.5.2 Estabilización mecánica

La estabilización mecánica consiste en modificar la estructura granulométrica del suelo para mejorar su resistencia y durabilidad. Las técnicas más frecuentes son:

1. **Adición de agregados gruesos** (arena, grava) para incrementar la fricción interna y la capacidad de soporte.
2. **Mezcla de suelos de distinta naturaleza** (ejemplo: arenas con arcillas), con el fin de alcanzar una curva granulométrica continua y estable.
3. **Compactación controlada**, logrando una densidad ≥ 95 % del Proctor estándar o modificado, según especificaciones de NEVI-12.

Tabla 3-6: Mejoras típicas por estabilización mecánica

Método	Mejora esperada en CBR (%)
Adición de arena a arcilla	30–50
Incorporación de grava	50–100
Compactación óptima	20–40

Nota: Datos adaptados de FHWA (2020) y Montejo Fonseca (3ra ed.).

3.5.3 Estabilización química

La estabilización química busca incrementar la resistencia al corte y reducir la plasticidad de la subrasante mediante reacciones químicas que mejoran su desempeño estructural. Los aditivos más empleados en proyectos viales son:

- **Cal:** especialmente indicada para suelos arcillosos plásticos. Produce floculación y aglomeración de partículas, reduciendo el índice de plasticidad (IP) y aumentando la trabajabilidad.
- **Cemento Portland:** adecuado en suelos granulares o mixtos, aporta rigidez adicional al suelo tratado y mejora su capacidad portante.
- **Cloruros y polímeros:** usados principalmente en estabilizaciones superficiales, control de polvo y reducción de humedad capilar.

3.5.3.1 Ecuación básica para dosificación de cal:

$$Cal (\%) = \frac{PI_i - PI_f}{PI_i} \times 100$$

Donde:

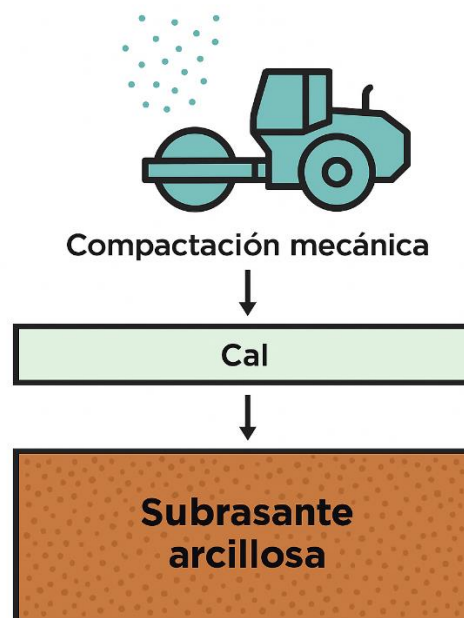
- PI_i = Índice de plasticidad inicial.
- PI_f = Índice de plasticidad final esperado.

Ejemplo: Si un suelo arcilloso tiene $PI_i = 30$ y se desea reducir a $PI_f = 15$:

$$Cal (\%) = \frac{30 - 15}{30} \times 100 = 50\%$$

Este valor representa la proporción de reducción de plasticidad, y debe transformarse en una dosificación realista mediante ensayos de laboratorio (generalmente entre 2 % y 6 % en peso del suelo seco, según FHWA y AASHTO M 216).

Figura 3-11: Estabilización química con cal y compactación mecánica



Nota: Muestra la reducción de plasticidad y el aumento de capacidad portante en una subrasante arcillosa.

3.5.4 Control de calidad y verificación de mejora

Después de aplicar el tratamiento químico, es indispensable verificar el cumplimiento de los parámetros de diseño mediante:

- **Ensayos de CBR** en muestras tratadas y compactadas.
- **Control de densidad in situ** mediante métodos nuclear o arena de cono, verificando la compactación alcanzada.

- **Placa de carga estática (AASHTO T-222) o FWD** para estimar módulos equivalentes y validar el soporte estructural.

Criterio de aceptación normativo:

Un suelo tratado debe alcanzar como mínimo:

- **CBR ≥ 8 %**, lo cual corresponde a un

$$Mr = 1500 \cdot 8 = 12000 \text{ psi} = 82.737 \text{ MPa}$$

según AASHTO-93.

- Este nivel de resistencia suele considerarse suficiente para soportar tránsito T2 (ESAL $\leq 10^6$), evitando refuerzos adicionales en capas superiores.

Tabla 3-7: Control de calidad típico de subrasante mejorada

Ensayo	Frecuencia recomendada	Criterio mínimo
CBR in situ	1 cada 250 m	$\geq 8 \%$
Densidad in situ	1 cada 150 m ²	$\geq 95 \%$ Proctor (estándar o modificado)
Placa de carga / FWD	1 cada 500 m	Módulo equivalente cumple diseño especificado

3.5.4.1 Ejemplo práctico de estabilización

Se tiene un tramo de 500 m con CBR promedio inicial = 4 %, valor inaceptable para tráfico **T2** (ESAL $\leq 10^6$).

Proceso de estabilización

1. Se mezcla la subrasante con 3 % de cal y 20 % de arena.
2. El CBR final medido in situ después del tratamiento es 8 %.
3. A partir de este valor se recalculan los parámetros de diseño.

Cálculo del módulo resiliente Mr

Como $CBR = 8\%$ y $7.2 < CBR \leq 20$, se aplica la segunda correlación AASHTO-93:

$$Mr = 3000 \cdot (CBR)^{0.65}$$

$$Mr = 3000 \cdot (8^{0.65}) = 11591.236 \text{ psi}$$

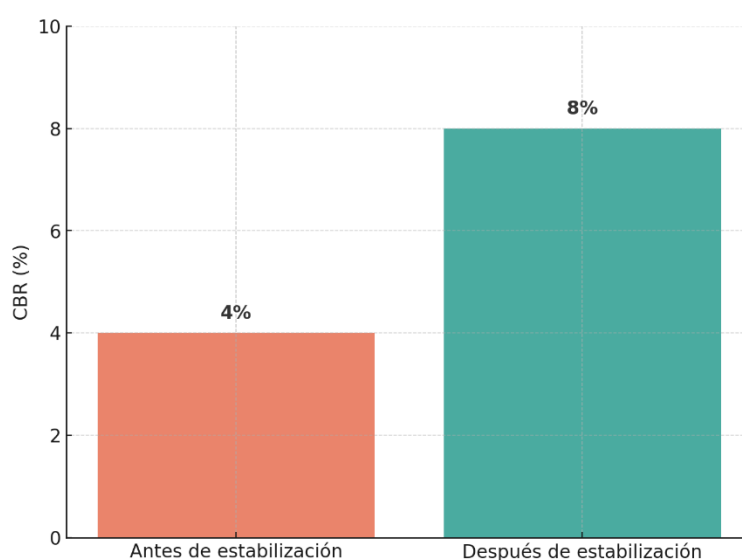
Conversión exacta a MPa:

$$Mr = 11591.236 \cdot 0.006895 = 79.92 \text{ MPa}$$

Conclusión:

- La estabilización combinada (cal + arena) duplicó el valor de CBR (de 4 % a 8 %), incrementando el módulo resiliente de 41.369 MPa a 79.92 MPa.
- El pavimento puede reducir su espesor estructural en ≈ 10 cm de acuerdo con los criterios de NEVI-12, lo que optimiza significativamente los costos del proyecto.

Figura 3-12: Incremento de CBR por estabilización combinada



Nota: Muestra la comparación entre el CBR inicial y el obtenido tras la mejora.

3.6 Correlación CBR–k para suelos en pavimentos rígidos

El módulo de reacción k es un parámetro fundamental en el diseño de pavimentos rígidos, pues representa la capacidad de soporte combinada de la subrasante y de las capas de apoyo inmediato. Su determinación más confiable se realiza mediante el ensayo de placa de carga (AASHTO T-222, ASTM D1196). Sin embargo, dado que este procedimiento puede resultar costoso y requiere equipamiento especializado, en etapas de estudio preliminar es posible apoyarse en correlaciones empíricas CBR– k , siempre verificadas posteriormente en campo.

3.6.1 Concepto del módulo de reacción k

El parámetro k se expresa en kN/m^3 y se define como:

$$k = \frac{P}{\Delta}$$

Donde:

- P = presión aplicada (kN/m^2)
- Δ = deflexión medida (m)
- Un k alto indica una subrasante rígida y estable.
- Un k bajo refleja un suelo compresible, con mayor susceptibilidad al bombeo y fallas por fatiga de losas.

3.6.2 Correlaciones empíricas CBR– k

Las normas AASHTO-93 y NEVI-12 permiten el uso de correlaciones CBR– k únicamente en proyectos preliminares o cuando no se dispone de ensayo de placa de carga. En todo caso, los valores deben ajustarse con factores de campo, considerando condiciones de humedad, drenaje y rigidez de capas de apoyo.

Ejemplos típicos de rangos de correlación adoptados en manuales de diseño:

CBR (%)	Clasificación típica del suelo	Rango de k (kN/m^3) aceptable
2 – 3	Arcillas de alta plasticidad (A-7-6, CH)	150 – 250
4 – 6	Arcillas de plasticidad media (A-6, CL)	250 – 400
7 – 10	Suelos granulares con finos (A-2-4, SC)	400 – 600
> 10	Gravas y arenas bien graduadas (A-1-a, GW)	600 – 800

Rangos de referencia extraídos de NEVI-12, Vol. 3, con base en correlaciones empíricas y verificación en placa de carga.

Ejemplo normativo de aplicación

- Para un CBR = 6 % (subrasante arcillosa de plasticidad media, clasificada como A-6/CL), el rango de k aceptable para diseño preliminar es:

$$k \in [250, 400] \text{ kN/m}^3$$

Este valor debe ser confirmado con ensayo de placa de carga, el cual proporciona la medida definitiva para el diseño de losas de concreto.

Criterio técnico

- El ensayo de placa de carga sigue siendo el método de referencia para determinar k .

- Las correlaciones CBR–k solo se aceptan en fases preliminares y deben ajustarse según las condiciones locales.
- Adoptar este enfoque garantiza diseños más confiables, evita sesgos significativos en la estimación del soporte y mantiene coherencia con las guías AASHTO-93 y NEVI-12.

3.6.3 Clasificación de subrasante para pavimentos rígidos

Para fines prácticos de diseño preliminar, se recomienda utilizar tablas de correlación CBR–Mr–k, siempre considerando que:

- Mr debe calcularse exclusivamente con las expresiones por tramos de AASHTO-93 (unidades base en psi y conversión exacta a MPa: 1 psi = 0.006894757293168 MPa).
- k debe obtenerse por placa de carga (AASHTO T-222 / ASTM D1196). Solo en fase preliminar puede estimarse como rango con base en NEVI-12, ajustando por condiciones de humedad y por la rigidez de las capas de apoyo.
- El valor definitivo de k para el diseño de losas deberá confirmarse in situ (placa de carga o FWD).

Tabla 3-8: Correlación CBR–k para suelos de subrasante

CBR (%)	Mr (MPa, AASHTO-93)	Rango de k (kN/m ³ , NEVI-12)	Calidad estructural
3 – 4	31.026 – 41.369	250 – 340	Muy baja
5 – 6	51.711 – 62.053	300 – 400	Baja
7 – 8	72.395 – 79.919	400 – 460	Media
9 – 10	86.278 – 92.393	460 – 520	Buena
> 10 ¹	98.298 – 144.981 ¹	≥ 520	Excelente

Notas.

1. El intervalo “> 10 %” se ha representado aquí como 11–20 % a efectos prácticos de diseño preliminar, con Mr exacto por AASHTO-93:
 - 11 % → Mr=98.298 MPa; • 20 % → Mr=144.981 MPa.

Para $\text{CBR} > 20 \%$, utilice la tercera expresión de AASHTO-93 (forma logarítmica); esos valores no se listan en esta tabla.

2. Los valores de M_r se han calculado con las fórmulas por tramos AASHTO-93 (base psi) y se muestran en MPa con conversión exacta.
3. Los rangos de k son referenciales de NEVI-12 para estudios preliminares; el valor final debe confirmarse con placa de carga (o FWD) y ajustarse por humedad, nivel freático, drenaje y capas granulares.

3.6.3.1 Ejemplo práctico de diseño inicial

Supongamos un proyecto de pavimento rígido con:

- $\text{CBR de diseño} = 6 \%$
- Ensayo de placa de carga no disponible (se usará correlación preliminar)

1. Estimamos del M_r :

$$M_r = 1500 \times 6 = 9000 \text{ psi} = 62.053 \text{ MPa}$$

2. Calculamos k :

Según tabla de correlación (NEVI-12), para $\text{CBR} = 6 \%$ se adopta:

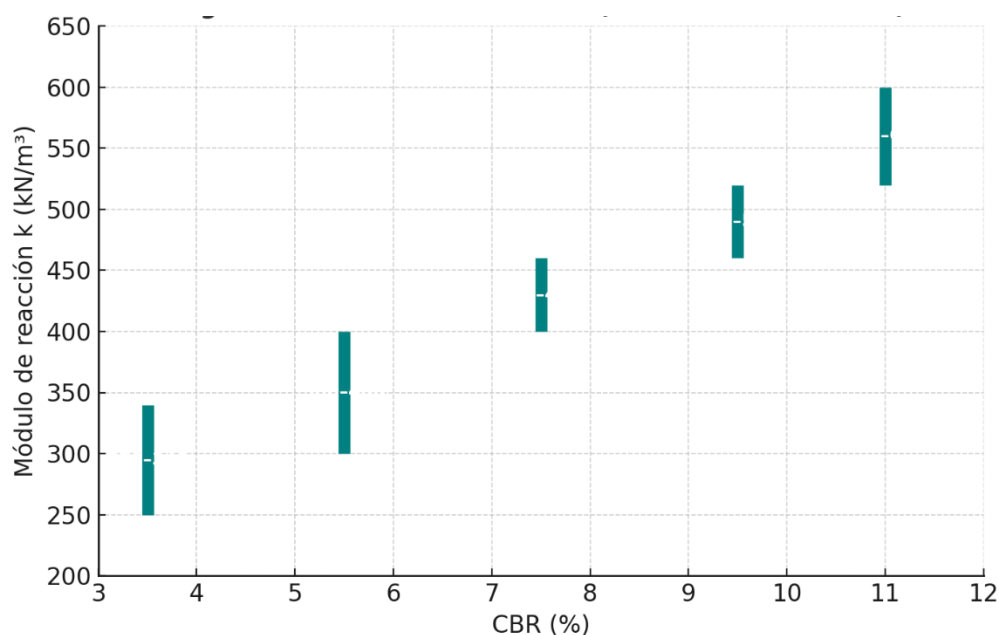
$$k \in [300, 400] \text{ kN/m}^3$$

3. **Espesor preliminar de losa (NEVI-12):**

Con tránsito **T2** y subrasante de baja capacidad ($\text{CBR} = 6 \%$, $M_r=62.053\text{MPa}$, $k\approx 300\text{--}400 \text{ kN/m}^3$):

$$\text{Espesor de losa recomendado} \approx 20 \text{ cm}$$

Figura 3-13: Correlación CBR– k (NEVI-12 / AASHTO-93)



Nota: La figura muestra los rangos de módulo de reacción k asociados a diferentes valores de CBR de subrasante. Estos valores son empleados únicamente en diseño preliminar de pavimentos rígidos, debiendo verificarse con ensayo de placa de carga para el diseño definitivo.

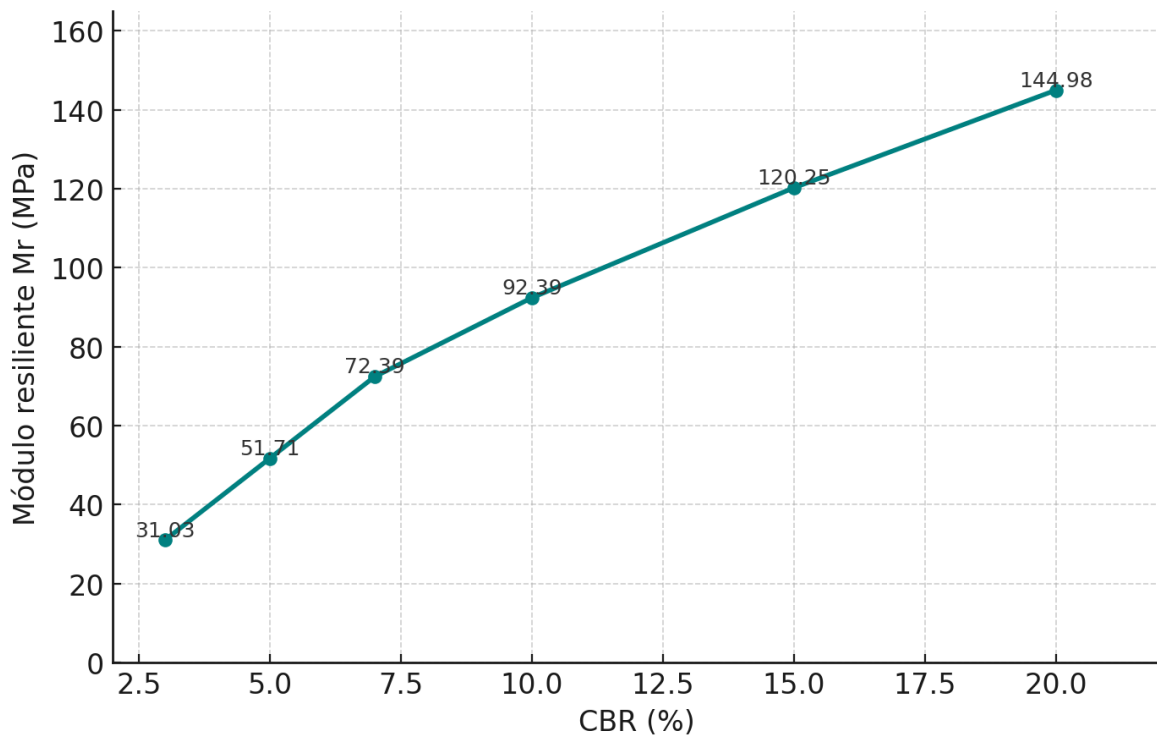
3.6.4 Recomendaciones para diseño y verificación

1. Verificar in situ con placa de carga, especialmente en aeropuertos o vías de tráfico pesado.
2. Aplicar factores de corrección por humedad y espesor de capas granulares según NEVI-12.
3. Usar siempre CBR de diseño, no valores máximos, para evitar fallas por bombeo.
4. Complementar con análisis mecanicista para verificar deflexiones y esfuerzos críticos.

3.6.5 Correlación CBR– M_r para pavimentos flexibles

En el caso de los pavimentos flexibles, la variable más relevante es el módulo resiliente (M_r), el cual se obtiene a partir del CBR de diseño mediante las expresiones normativas por tramos de AASHTO-93. Esta correlación es ampliamente usada en metodologías mecanicistas-empíricas para vincular el ensayo empírico de CBR con el análisis estructural multicapa. La siguiente figura muestra cómo, a medida que aumenta el CBR de la subrasante, crece también el módulo resiliente, mejorando la capacidad de soporte para cargas repetidas.

Tabla 3-9. Correlación normativa CBR– M_r (AASHTO-93)



Nota. La figura presenta la relación entre el índice CBR y el módulo resiliente (M_r), calculado con las fórmulas de AASHTO-93. Este valor se utiliza en el diseño mecanicista-empírico de pavimentos flexibles para simular la respuesta de la subrasante bajo cargas repetidas.

Capítulo 4. Materiales y Mezclas para Pavimentos Flexibles

4.1 Propiedades de los agregados pétreos

Los agregados pétreos son el componente estructural principal de los pavimentos flexibles, representando entre 90–95 % en peso de la mezcla asfáltica. Su calidad y propiedades físicas, mecánicas y químicas determinan la resistencia a la deformación permanente, la durabilidad y la resistencia al desgaste del pavimento.

La NEVI-12 y las normas AASHTO M 80, ASTM C136 y ASTM C127 establecen que los agregados para pavimentos deben cumplir requisitos granulométricos, resistencia al desgaste, adherencia al ligante y durabilidad frente a ciclos de humedad y temperatura. Su caracterización garantiza que el pavimento cumpla con la vida útil de diseño.

4.1.1 Clasificación de los agregados

Los agregados se clasifican en:

- **Agregados gruesos:** retenidos en el tamiz 4.75 mm (No. 4), como gravas trituradas o canto rodado.
- **Agregados finos:** pasan por el tamiz 4.75 mm y son retenidos en el tamiz 0.075 mm (No. 200), como arenas naturales o trituradas.
- **Filler mineral:** pasa por el tamiz 0.075 mm y rellena los vacíos de la mezcla, mejorando la cohesión.

Figura 4-1: Clasificación de agregados en una mezcla asfáltica

25%	45%	5%
		
Agregado grueso > 4,75 mm	Agregado fino 0,075 mm – – 4,75 mm	Filler o polvo mineral < 0,075 mm
Aporta rigidez, resistencia a la deformación	Mejora la trabajabilidad y la cohesión	Contribuye al llenado de huecos, adherencia y estabilidad

Nota: Muestra la separación en fracciones de agregado grueso, fino y filler según NEVI-12.

4.1.2 Propiedades físicas de los agregados

Las propiedades físicas determinan la capacidad de los agregados para resistir degradación y mantener estabilidad volumétrica. Los ensayos más relevantes son:

- Densidad y absorción (ASTM C127/C128)
- Granulometría por tamizado (ASTM C136)
- Durabilidad frente a sulfatos (ASTM C88)

Tabla 4-1: Propiedades físicas recomendadas para agregados en pavimentos flexibles

Propiedad	Norma ASTM/AASHTO	Límite típico
Absorción (%)	C127/C128	≤ 2
Desgaste Los Ángeles (%)	C131/C535	≤ 35
Durabilidad (sulfatos) (%)	C88	≤ 12

Ejemplo práctico:

En un proyecto de carretera T2 en Ecuador, las gravas de cantera local presentaron:

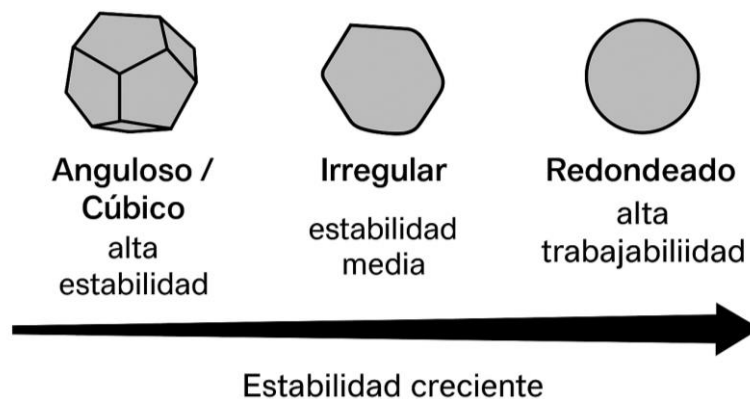
absorción = 1.8 %, desgaste Los Ángeles = 28 %, cumpliendo **NEVI-12** para mezclas asfálticas en capas de rodadura.

4.1.3 Propiedades mecánicas y de forma

Las propiedades mecánicas indican la resistencia del agregado a cargas repetidas y desgaste superficial, mientras que las de forma afectan la trabajabilidad y estabilidad de la mezcla:

- **Angulosidad y forma cúbica:** mejora la fricción interna.
- **Equivalente de arena (ASTM D2419):** evalúa la limpieza del agregado fino.
- **Resistencia al pulimento (PSV):** importante en capas de rodadura por seguridad vial.

Figura 4-2: Ejemplos de formas de agregado y su efecto en la estabilidad de la mezcla



Nota: Agregados cúbicos y angulosos proporcionan mejor entrelazamiento que los redondeados.

4.1.4 Adhesión y compatibilidad con ligantes

La adhesión agregado-ligante es esencial para evitar el desprendimiento y el stripping bajo efecto de agua y cargas cíclicas. Factores esenciales:

- **Superficie rugosa y limpia** → mejora la adherencia.
- **Ensayo de adhesividad con asfalto (ASTM D3625)** → determina la resistencia a la acción del agua.
- **Uso de aditivos anti-desgarrantes** (cal hidratada o aminas) en climas húmedos.

Ejemplo:

Un agregado con absorción elevada (>2 %) puede requerir tratamiento con cal para garantizar adhesión duradera según NEVI-12.

4.1.5 Requisitos normativos y selección de agregados

Según NEVI-12 y AASHTO M 80, la selección de agregados debe garantizar:

1. Granulometría adecuada para evitar exudación o segregación.
2. Resistencia suficiente al desgaste y durabilidad.
3. Compatibilidad química con ligantes y emulsiones.

Tabla 4-2: Requisitos normativos para agregados en mezclas asfálticas

Propiedad	NEVI-12	AASHTO M 80
Absorción (%)	≤ 2	≤ 2
Desgaste L.A. (%)	≤ 35	≤ 40
Durabilidad sulfatos (%)	≤ 12	≤ 12

Estos criterios aseguran que el agregado mantenga su integridad durante la vida útil del pavimento, soportando cargas cíclicas y condiciones ambientales.

4.2 Tipos de ligantes asfálticos y emulsiones

Los ligantes asfálticos son el componente adhesivo de los pavimentos flexibles, responsables de unir los agregados, impermeabilizar la estructura y absorber deformaciones. Su selección y dosificación determinan la durabilidad, resistencia a fatiga y comportamiento frente al clima.

Se dividen principalmente en:

1. Cemento asfáltico de petróleo (CAP) o Asfalto puro.
2. Asfaltos modificados (con polímeros, caucho).
3. Emulsiones asfálticas (mezcla de asfalto y agua con emulsionantes).

El diseño estructural debe considerar viscosidad, penetración, punto de ablandamiento y comportamiento reológico del ligante para garantizar el desempeño de la mezcla.

4.2.1 Cementos asfálticos puros (CAP)

Los cementos asfálticos se clasifican según su grado de penetración (ASTM D946) o viscosidad (ASTM D3381).

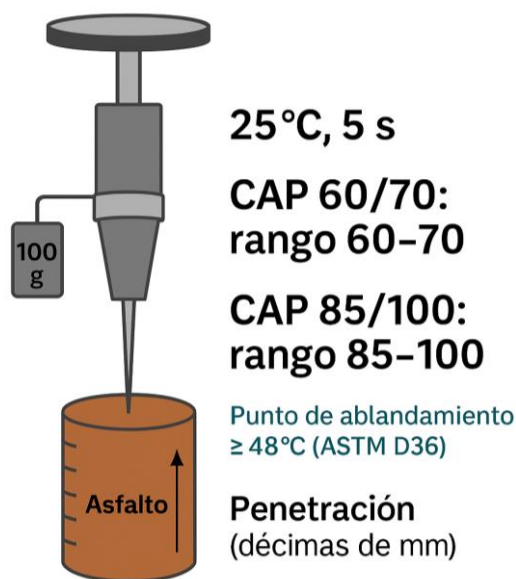
- **Grado por penetración:**
 - 60/70 (más usado en climas tropicales).
 - 85/100 (regiones templadas).
- **Grado por viscosidad:**
 - AC-20 o AC-30 según la viscosidad a 60 °C.

Ejemplo:

La NEVI-12 establece que para vías T2 se recomienda un CAP 60/70, con:

- Penetración = 60–70 décimas de mm (a 25 °C, 100 g, 5 s).
- Punto de ablandamiento ≥ 48 °C (ASTM D36).

Figura 4-3: Ensayo de penetración en asfalto



Nota: Evalúa la dureza relativa del asfalto para su clasificación.

4.2.2 Asfaltos modificados

Los asfaltos modificados incorporan polímeros (SBS, EVA), caucho reciclado u otros aditivos para mejorar la elasticidad y resistencia a deformaciones permanentes.

Beneficios:

1. Mayor resistencia al ahuellamiento.
2. Menor fisuración por fatiga y térmica.
3. Mejor comportamiento en climas extremos.

Ejemplo práctico:

Un CAP 60/70 modificado con 4 % SBS incrementa su Punto de ablandamiento de 48 °C a 62 °C y su Recuperación elástica a 70 %.

Cálculo de contenido de polímero (C_p):

$$C_p(\%) = \frac{M_{polímero}}{M_{asfalto + polímero}} \times 100$$

Si se adicionan 4 kg de polímero a 96 kg de CAP, entonces:

$$C_p = \frac{4}{100} \times 100 = 4\%$$

4.2.3 Emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas son mezclas de CAP, agua y emulsionantes que facilitan la aplicación a bajas temperaturas, reducen el consumo de combustible y permiten trabajos en climas húmedos.

- Clasificación según carga iónica (ASTM D977):
 - Catiónicas (C): CMC, CRS (rápida), CMS (media), CML (lenta).
 - Aniónicas (A): menos usadas en Latinoamérica.

Ejemplo de aplicación:

- CMC-2 para riegos de liga.
- CRS-1 para lechadas bituminosas.

Cálculo de residuo asfáltico (R_a):

$$R_a(\%) = \frac{M_{asfalto}}{M_{emulsión}} \times 100$$

Si 100 kg de emulsión contienen 65 kg de asfalto puro:

$$R_a = \frac{65}{100} \times 100 = 65\%$$

4.2.4 Propiedades reológicas y su importancia

La reología del asfalto evalúa su comportamiento viscoso y elástico ante temperatura y carga.

- Alta temperatura: debe ser viscoso para evitar ahuellamiento.
- Baja temperatura: debe ser flexible para evitar fisuración térmica.

Pruebas (Superpave):

- DSR (Dynamic Shear Rheometer) → módulo complejo y ángulo de fase.
- BBR (Bending Beam Rheometer) → flexibilidad a bajas temperaturas.

Tabla 4-3: Propiedades típicas de ligantes asfálticos

Tipo de ligante	Penetración (0.1 mm)	Punto ablandamiento (°C)	Residuos (%)
CAP 60/70	60–70	48–52	100
Emulsión CMC-2	40–50	47–50	63–65
Asfalto mod. SBS 4 %	55–65	60–65	100

4.2.5 Selección de ligantes según condiciones de proyecto

La selección del ligante depende de:

1. Clima (temperatura máxima/mínima).
2. Tráfico (ESAL proyectados).
3. Tipo de mezcla (densa, SMA, drenante).

Ejemplo resuelto:

- Carretera T3 (rural, clima cálido, T_{máx} 38 °C).
- Se requiere mezcla densa en caliente → **CAP 60/70** o **modificado con 3 % SBS**.
- Para riego de liga → **Emulsión CMC-2**, con **residuo 65 %**, calculado como se demostró en 4.2.3.

Figura 4-4: Selección de ligante según clima y tráfico

Clima cálido / tráfico medio-alto  CAP 60/70 • Penetración 60-70 (0,1 mm) • Punto de ablandamiento $\geq 48^{\circ}\text{C}$	Clima templado / tráfico alto  Asfalto modificado (SBS 3 %) • Mejor resistencia al ahuellamiento • Mayor resistencia a agrietamiento	Aplicación en frío clima húmedo  Emulsión CMC-2 • Fácil uso en bajas temperaturas • Residuo = 65%
--	---	--

Nota: Muestra la aplicación de CAP, asfalto modificado y emulsiones en diferentes escenarios.

4.3 Ensayo Marshall: determinación del COA

El Ensayo Marshall es el método clásico para diseñar mezclas asfálticas en caliente (MAC), determinando el Contenido Óptimo de Asfalto (COA) que garantiza la estabilidad, flujo y durabilidad de la mezcla. Se basa en la compactación de probetas cilíndricas y su ensayo de carga hasta falla para evaluar la estabilidad (resistencia a deformación plástica) y el flujo (deformación antes de la falla).

El COA se define como aquel contenido de ligante que logra un equilibrio entre estabilidad, vacíos de aire y durabilidad, cumpliendo los requisitos de la NEVI-12 y AASHTO T245.

4.3.1 Fundamento del método Marshall

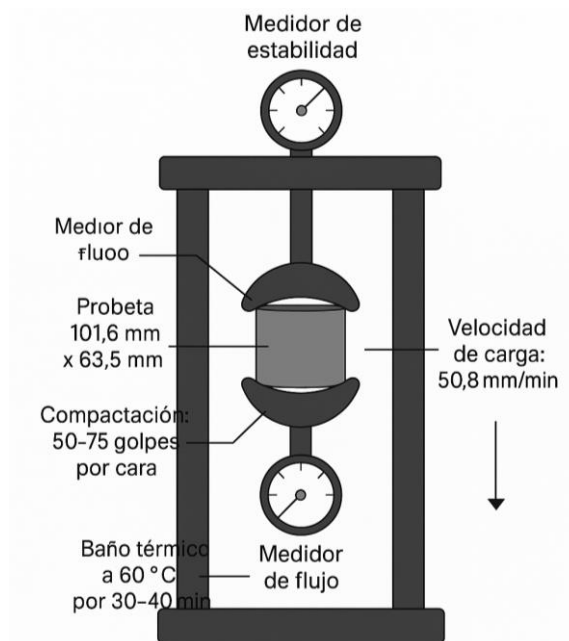
El método consiste en:

1. Preparar probetas cilíndricas de 101.6 mm de diámetro y 63.5 mm de altura, compactadas con 50–75 golpes por cara, según la categoría de tránsito.
2. Someter las probetas a baño térmico de 60°C durante 30–40 min.
3. Aplicar carga diametral en un marco Marshall a velocidad de 50.8 mm/min.

Parámetros medidos:

- Estabilidad (kgf o kN)
- Flujo (0.25 mm o 0.01 in)
- Peso específico aparente (para calcular vacíos)

Figura 4-5: Equipo de ensayo Marshall



Nota: Ilustra la aplicación de carga diametral para medir estabilidad y flujo.

4.3.2 Preparación de mezclas y diseño experimental

Para determinar el COA, se elaboran mezclas con diferentes contenidos de asfalto, normalmente 4–6 niveles, con incrementos de 0.5 %.

Ejemplo típico:

- Contenidos de asfalto: 4.0 %, 4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %
- 3 probetas por contenido → 15 probetas

Se determinan los siguientes parámetros en laboratorio:

- Estabilidad Marshall (SM)
- Flujo (F)
- Vacíos de aire (Va)
- Vacíos en el agregado mineral (VMA)
- Vacíos llenos con asfalto (VFA)

Estos resultados se grafican para encontrar el COA según la intersección de criterios normativos.

4.3.3 Criterios normativos de diseño

Según NEVI-12 y AASHTO T245, el COA debe cumplir simultáneamente:

1. Estabilidad mínima según categoría de tránsito.

2. Flujo dentro del rango permitido (2–4 mm para T2).
3. Contenido de vacíos de aire (Va) entre 3 y 5 %.
4. VFA ≥ 65 % para capas de rodadura.

Tabla 4-4: Requisitos Marshall para pavimentos flexibles (NEVI-12)

Tránsito	Estabilidad (kgf)	Flujo (mm)	Va (%)	VFA (%)
T1	500	2–4	3–5	≥ 65
T2	800	2–4	3–5	≥ 65
T3	1200	2–4	3–5	≥ 65

4.3.4 Cálculo del Contenido Óptimo de Asfalto (COA)

El COA se determina con base en tres criterios:

1. Contenido correspondiente a la máxima estabilidad (SM_{máx}).
2. Contenido correspondiente a 4 % de vacíos de aire (Va).
3. Contenido correspondiente a VFA ≥ 65 %.

$$COA = \frac{Asf_{SM} + Asf_{Va} + Asf_{VFA}}{3}$$

4.3.4.1 Ejemplo práctico

Se ensayaron mezclas con los siguientes resultados resumidos:

Tabla 4-5: Datos de ensayo Marshall

Cont. Asf. (%)	SM (kgf)	Flujo (mm)	Va (%)	VFA (%)
4.0	760	2.0	5.2	58
4.5	880	2.3	4.3	63
5.0	940	2.6	3.8	69
5.5	910	2.9	3.2	74
6.0	850	3.2	2.7	78

Cálculo del COA:

1. SM_{máx} a 5.0 % $\rightarrow$ Asf_{SM} = 5.0
2. Va = 4 % se alcanza entre 4.5 y 5.0 $\rightarrow$ interpolación exacta

$$Asf_{Va} = 4.5 + \frac{4.3 - 4.0}{4.3 - 3.8} \times 0.5$$

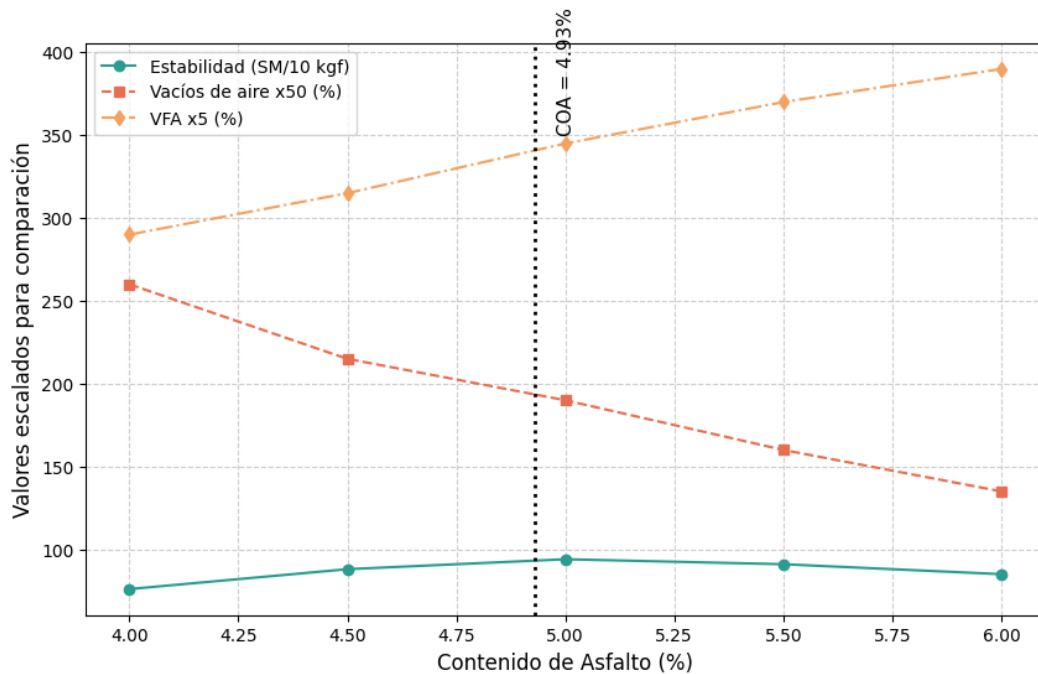
$$Asf_{Va} = 4.5 + 0.3/0.5 \times 0.5 = 4.5 + 0.3 = 4.8\%$$

3. VFA $\geq 65\%$ se cumple en 5.0 % $\rightarrow$ Asf_VFA = 5.0

$$COA = \frac{5.0 + 4.8 + 5.0}{3} = 4.93\%$$

El Contenido Óptimo de Asfalto (COA) = 4.93 %, exacto para el diseño Marshall de esta mezcla.

Figura 4-6: Determinación gráfica del COA



Nota: Muestra las curvas de estabilidad, vacíos y VFA vs. contenido de asfalto.

4.4 Métodos de dosificación de mezclas asfálticas

La dosificación de mezclas asfálticas consiste en definir las proporciones exactas de agregados, filler y ligante para garantizar que el pavimento soporte el tránsito proyectado y cumpla con los criterios de durabilidad, estabilidad y flexibilidad.

Aunque el método Marshall es el más difundido y ya se explicó en detalle en el epígrafe 4.3, existen otros métodos relevantes que permiten mejorar la confiabilidad estructural, especialmente en vías de tráfico pesado o condiciones ambientales extremas.

4.4.1 Método Hveem

El método Hveem se utiliza principalmente en Estados Unidos y está orientado a mezclas asfálticas densas en climas cálidos.

- **Principio:** Evalúa la resistencia al desplazamiento lateral (estabilidad Hveem) y la cohesión interna de la mezcla.
- **Ensayos importantes:**
 1. **Estabilómetro** → mide la resistencia lateral de la probeta.
 2. **Cohesiómetro** → evalúa la adherencia interna entre partículas.
- **Ventajas:**
 1. Permite analizar desplazamiento lateral bajo cargas.
 2. Adecuado para tránsito medio y condiciones de calor elevado.
- **Limitaciones:**
 1. Equipos menos disponibles en Latinoamérica.
 2. Requiere personal entrenado y control riguroso de humedad y temperatura.

4.4.2 Método Superpave

El Superpave (SUPERior PERforming Asphalt PAVement) forma parte del Sistema de Diseño Mecánico-Empírico, desarrollado bajo el programa SHRP (Strategic Highway Research Program) en EE. UU.

- **Principio:** Simula la densificación real de la mezcla bajo tránsito mediante compactación giratoria, y evalúa la reología del ligante según condiciones climáticas y carga acumulada.
- **Parámetros volumétricos:**
 - **Va:** Vacíos de aire = $4 \pm 0.5 \%$
 - **VMA:** Vacíos en el agregado mineral $\geq 13 \%$
 - **VFA:** Vacíos llenos con asfalto = 65–75 %
- **Ensayos asociados:**
 - DSR (Dynamic Shear Rheometer) → Módulo complejo y ángulo de fase.
 - BBR (Bending Beam Rheometer) → Flexibilidad a bajas temperaturas.

- Compactador Giratorio Superpave → Simula compactación real.
- **Ventajas:**
 - Altamente confiable para autopistas y aeropuertos (T3-T4).
 - Considera el clima, tráfico y fatiga.
- **Limitaciones:**
 - Costo elevado de equipos y ensayos.
 - Mayor complejidad técnica en la implementación.

Tabla 4-6: Comparación de métodos de diseño de mezclas asfálticas

Método	Compactación	Parámetros clave	Aplicación típica
Marshall	Martillo de impacto	SM, Flujo, Va, VFA	Vías urbanas y rurales T1-T2
Hveem	Rodillo giratorio	Estabilidad y cohesión	Vías urbanas cálidas T2-T3
Superpave	Compactador giratorio	Va, VMA, VFA, G*/senδ	Autopistas y aeropuertos T3-T4

- Marshall: Adecuado para vías con tráfico bajo a medio, de fácil implementación en laboratorio.
- Hveem: Ideal para climas cálidos y permite evaluar el desplazamiento lateral de la mezcla.
- Superpave: Ofrece el máximo control estructural, recomendado para tráfico pesado y proyectos de alto desempeño.

4.4.3 Diagrama de flujo del proceso de dosificación

El siguiente diagrama muestra el proceso general de diseño y dosificación de mezclas asfálticas, aplicable a cualquier método (Marshall, Hveem o Superpave):

Etapas principales del flujo:

1. **Caracterización de materiales** → Agregados (granulometría, forma, densidad) y ligante (penetración, PG).
2. **Selección de granulometría y método de diseño** según tráfico y clima.
3. **Preparación de probetas** → Compactación según método elegido.

4. **Evaluación volumétrica y mecánica** → V_a , VMA , VFA , estabilidad o módulo dinámico.
5. **Determinación del contenido óptimo de asfalto (COA)** para cumplir todos los criterios.

Figura 4-7: Diagrama de flujo del proceso de dosificación de mezclas asfálticas



Nota: La figura muestra las etapas desde la caracterización de agregados y ligantes hasta la selección del contenido óptimo de asfalto.

4.5 Control de calidad en laboratorio y obra

El control de calidad en mezclas asfálticas garantiza que el pavimento construido cumpla con las especificaciones de diseño, asegurando su durabilidad y desempeño estructural. Este proceso abarca tanto ensayos de laboratorio como verificaciones en obra, desde la recepción de materiales hasta la colocación y compactación final.

El cumplimiento de NEVI-12, junto con normas AASHTO y ASTM, permite validar la calidad de agregados, ligantes y mezclas, reduciendo riesgos de fallas prematuras como ahuellamiento, fisuración o desprendimientos.

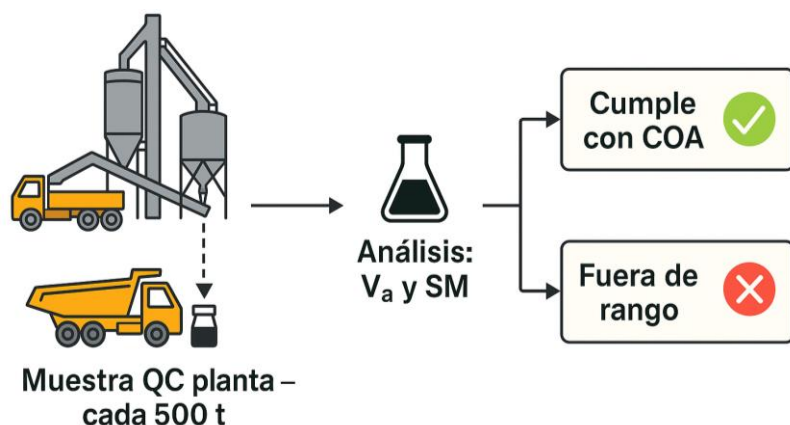
4.5.1 Control de calidad en laboratorio

El control de laboratorio se realiza antes y durante la producción de la mezcla, garantizando que las materias primas y la mezcla asfáltica cumplan los criterios de diseño.

Ensayos principales:

- **Agregados:** granulometría (ASTM C136), desgaste Los Ángeles (C131), equivalente de arena (D2419).
- **Ligante:** penetración (ASTM D5), punto de ablandamiento (ASTM D36), viscosidad (ASTM D4402).
- **Mezcla asfáltica:**
 1. Estabilidad y flujo Marshall (ASTM D6927).
 2. Contenido de vacíos (V_a , VMA, VFA).
 3. Ensayos de susceptibilidad al agua (ASTM D4867).

Ejemplo de aplicación:



En la planta, se extraen muestras cada 500 t de producción y se verifican V_a y SM para garantizar que la mezcla cumple con el COA definido en el diseño Marshall.

4.5.2 Control de calidad en obra

El control en obra se enfoca en la verificación del proceso constructivo, asegurando que la colocación, temperatura y compactación cumplan los requisitos de diseño.

Verificaciones frecuentes:

1. Temperatura de mezclado y colocación → 135–165 °C según tipo de ligante.
2. Número de pasadas de compactación según rodillo y método de obra.
3. Densidad y espesor → Medidos con núcleos y densímetro nuclear.

Tabla 4-7: Control de compactación en obra con densímetro nuclear



Nota: Permite verificar la densidad in situ sin extraer material, optimizando el control de calidad.

4.5.3 Frecuencias y criterios de aceptación

La NEVI-12 define frecuencias mínimas de muestreo y aceptación para garantizar calidad uniforme:

Tabla 4-8: Frecuencias típicas de control en mezclas asfálticas

Ensayo	Frecuencia mínima
Granulometría de agregados	1 por cada 500 t
Estabilidad y flujo Marshall	1 juego por cada 500 t
Contenido de vacíos (Va)	1 juego por cada 500 t
Densidad in situ	1 por cada 200 m de carril
Espesor de capa	1 por cada 200 m de carril

Nota: Valores basados en NEVI-12, Volumen 4.

4.5.4 Evaluación de conformidad y toma de decisiones

Cuando los resultados cumplen las especificaciones, la mezcla se acepta sin restricciones. Si algún parámetro no cumple, se procede a:

1. Ajustar el proceso → Variar contenido de asfalto o compactación.

2. Evaluar lotes mediante ensayos complementarios (densidad, permeabilidad, tracción indirecta).
3. Decidir su aceptación condicionada o reemplazo parcial según la magnitud de la desviación.

Ejemplo:

Si $V_a = 6\%$ (fuera de rango), se reduce el contenido de asfalto 0.3% en el siguiente lote y se evalúa nuevamente el SM y VFA.

4.5.4.1 Ejemplo práctico de control

En una vía T2 de 3 km, con producción diaria de 600 t, se implementó:

- 3 controles de laboratorio diarios (V_a , SM y VFA).
- Densidad in situ cada 200 m, obteniendo 95–97 % del Proctor modificado.
- Espesor promedio = $5\text{ cm} \pm 0.5\text{ cm}$.

Criterio:

El lote fue aceptado sin observaciones, confirmando que la mezcla y la construcción cumplen con las especificaciones NEVI-12.

4.6 Requisitos de granulometría y compactación

La granulometría y compactación son factores críticos en el desempeño de pavimentos flexibles, ya que determinan la resistencia estructural, la durabilidad y la impermeabilidad de la mezcla asfáltica.

Una granulometría bien graduada proporciona estabilidad y resistencia a la deformación, mientras que una compactación adecuada garantiza densidad uniforme, reduciendo la permeabilidad y el riesgo de fallas prematuras.

Los requisitos se establecen en NEVI-12, ASTM D3515 y AASHTO M29, que definen límites granulométricos, vacíos de aire y densidad mínima para capas de base y rodadura.

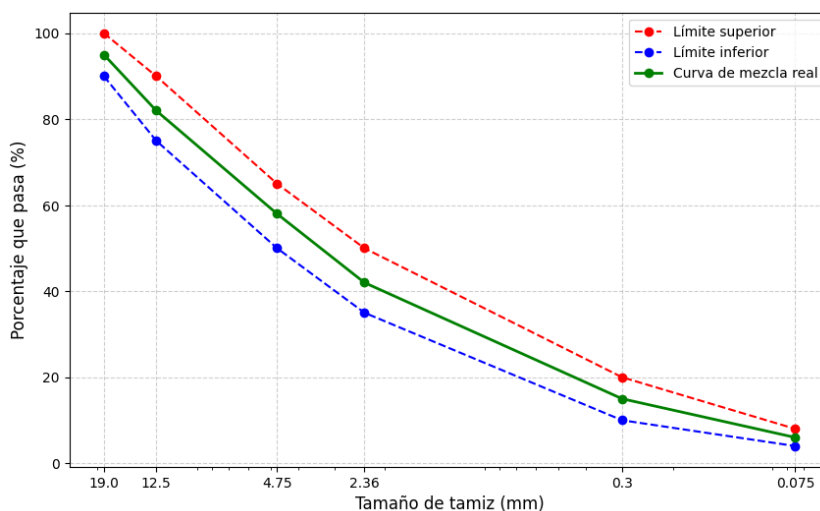
4.6.1 Importancia de la granulometría en mezclas asfálticas

La granulometría describe la distribución de tamaños de partículas en la mezcla.

- Una mezcla bien graduada:
 - Tiene interconexión óptima entre agregados.
 - Disminuye vacíos, mejora la resistencia al ahuellamiento.

- Una mezcla abierta o mal graduada:
 - Presenta exudación de asfalto o segregación.
 - Mayor permeabilidad y riesgo de desprendimientos.

Figura 4-8: Distribución granulométrica típica de mezcla densa



Nota: Muestra la curva entre los límites superior e inferior de NEVI-12.

4.6.2 Requisitos granulométricos según NEVI-12

La Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 establece bandas granulométricas para diferentes tipos de mezcla:

Tabla 4-9: Rango granulométrico típico para mezcla densa tipo MDC-2 (rodadura)

Tamiz (mm)	Límite superior (%)	Límite inferior (%)
19.0	100	90
12.5	90	75
4.75	65	50
2.36	50	35
0.3	20	10
0.075	8	4

Nota: Cumplir con estos rangos asegura mezclas densas y estables, evitando segregación y pérdida de ligante.

4.6.3 Requisitos de compactación

La compactación es el proceso de densificación de la mezcla asfáltica para eliminar vacíos de aire excesivos y lograr resistencia estructural y durabilidad.

Criterios típicos (NEVI-12 y AASHTO T166):

- Vacíos de aire (V_a): 3–5 % en capas de rodadura.
- Densidad in situ: ≥ 95 % de la densidad máxima de laboratorio (Proctor modificado).
- Número de pasadas de rodillo: Según tipo de rodillo y espesor de capa.

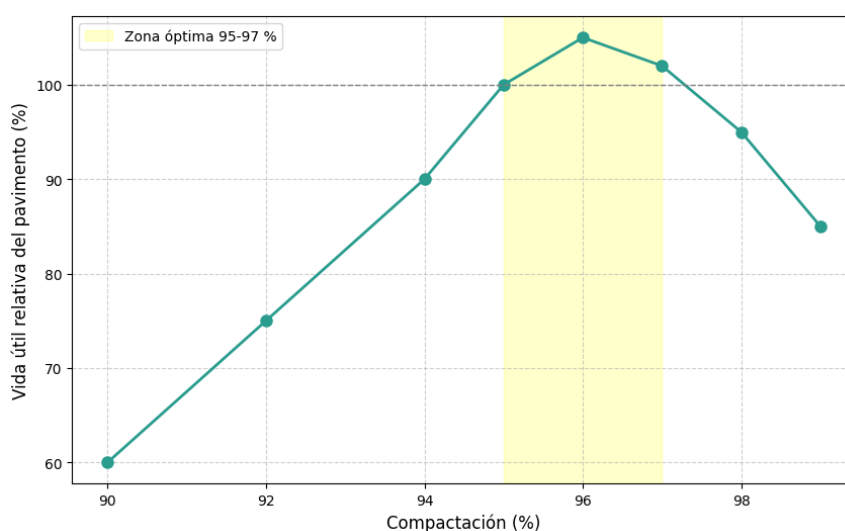
Tabla 4-10: Requisitos de compactación para capas asfálticas

Capa	V_a (%)	Densidad mínima (%)	Espesor típico (cm)
Rodadura (MDC-2)	3–5	≥ 95	4–6
Intermedia (MDC-1)	3–6	≥ 95	5–8
Base asfáltica (MB)	4–7	≥ 94	6–10

4.6.4 Influencia de la compactación en la durabilidad

- Compactación insuficiente (< 92 %):
 - Incrementa la permeabilidad.
 - Genera fisuración por fatiga y ahuellamiento prematuro.
- Compactación excesiva (> 98 %):
 - Puede producir exudación de ligante.
 - Reduce los vacíos necesarios para acomodación térmica.

Figura 4-9: Relación entre porcentaje de compactación y vida útil estimada



Nota: La mayor durabilidad se alcanza entre 95–97 % de compactación.

4.6.5 Ejemplo de verificación de granulometría y compactación

Se construye una capa de rodadura MDC-2 y se realiza el siguiente control:

Datos de campo y laboratorio:

- Densidad máxima de laboratorio: 2.42 g/cm³
- Densidad medida in situ: 2.31 g/cm³
- Vacíos de aire medidos: 4.2 %
- Límite de aceptación de NEVI-12: Densidad $\geq$ 95 %

Cálculos:

1. Porcentaje de compactación:

$$\text{Compactación (\%)} = \frac{D_{insitu}}{D_{lab}} \times 100$$

$$\text{Compactación (\%)} = \frac{2.31}{2.42} \times 100 = 95.45 \%$$

2. Comparación con criterios NEVI-12:

- Compactación $\geq$ 95 %
- Vacíos de aire = 4.2 % $\rightarrow$ dentro de 3–5 %

Conclusión:

El lote cumple con los requisitos de granulometría y compactación, asegurando la aceptación y una vida útil adecuada del pavimento.

4.7 Efecto del clima sobre el desempeño de la mezcla

El clima influye de manera determinante en el comportamiento de las mezclas asfálticas, ya que la temperatura y la humedad afectan tanto al ligante como a los agregados y a la estructura del pavimento.

El diseño y construcción de pavimentos flexibles debe considerar las condiciones ambientales durante la producción, colocación y servicio, ya que los cambios térmicos, la lluvia y los ciclos de congelación y deshielo aceleran fenómenos como fisuración, ahuellamiento y pérdida de adhesión.

4.7.1 Influencia de la temperatura

- Altas temperaturas:

- El ligante asfáltico disminuye su viscosidad, provocando ahuellamiento y deformación plástica.
- El ensayo de pista rodante (Wheel Tracking Test, ASTM D7226) se utiliza para evaluar este comportamiento.
- Bajas temperaturas:
 - Incrementa la rigidez del asfalto, favoreciendo la fisuración térmica.
 - Superpave clasifica ligantes PG (Performance Grade) según temperatura máxima y mínima esperada.

Ejemplo de selección de ligante:

En un clima con $T_{max} = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_{min} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, se recomienda PG 64-10, que soporta hasta $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ en servicio y $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin fisuración.

4.7.2 Efecto de la humedad y la lluvia

La humedad afecta principalmente la adherencia agregado-ligante, favoreciendo el stripping o desprendimiento del asfalto.

- Fenómenos asociados:
 1. Pérdida de cohesión interna por absorción de agua.
 2. Generación de fisuras y baches por bombeo de finos.
- Ensayos relevantes:
 - ASTM D4867: Resistencia conservada a tracción indirecta (TSR).
 - AASHTO T283: Ensayo de resistencia a la humedad.

Medidas preventivas:

- Uso de aditivos anti-stripping (cal hidratada, aminas).
- Control de permeabilidad y compactación adecuada.

4.7.3 Ciclos de congelación y deshielo

En zonas de clima frío, los ciclos de congelación y deshielo generan expansión y contracción del agua en los vacíos del pavimento, causando fisuras, baches y pérdida de soporte estructural.

- Consecuencias principales:
 1. Fisuración longitudinal y transversal.

2. Formación de baches por bombeo de agua.
- Medidas de mitigación:
 - Uso de bases granulares drenantes.
 - Incremento de espesor estructural según AASHTO 93 o MEPDG.
 - Selección de mezclas impermeables y densamente compactadas.

4.7.4 Radiación solar y envejecimiento del asfalto

La radiación ultravioleta (UV) y la oxidación aceleran el envejecimiento del asfalto, aumentando su rigidez y fragilidad.

- Efectos:
 1. Disminución de la ductilidad del ligante.
 2. Incremento de la susceptibilidad a fisuración térmica y fatiga.
- Ensayos asociados:
 - RTFO (Rolling Thin Film Oven) → Envejecimiento a corto plazo.
 - PAV (Pressure Aging Vessel) → Envejecimiento a largo plazo.

Medidas de diseño:

- Selección de ligantes modificados con polímeros o caucho.
- Espesor adecuado de capas para proteger la subrasante.

4.7.5 Ejemplo práctico de impacto climático

Se analiza una vía T2 en clima cálido-húmedo con:

- Temperatura máxima = 40 °C
- Precipitación anual = 1200 mm
- Ligante = CAP 60/70

Verificación paso a paso:

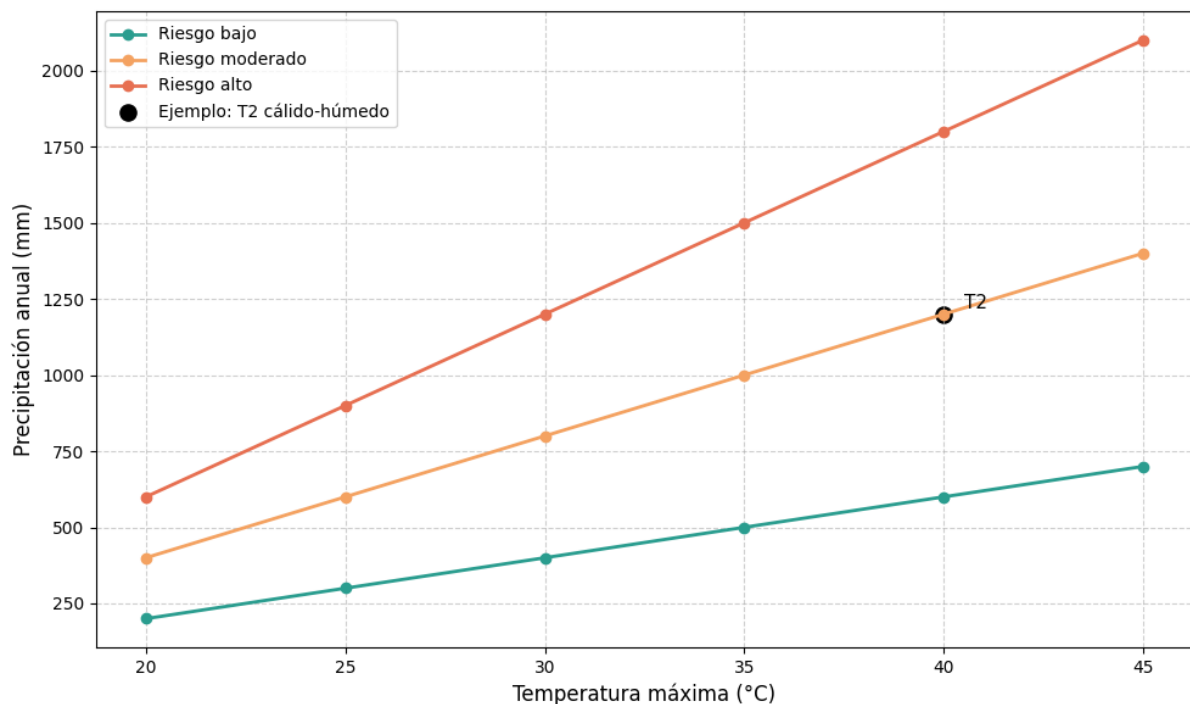
1. **Evaluación térmica (Superpave):**
 - $T_{max} + 6\text{ °C} = 46\text{ °C} \rightarrow$ PG mínimo requerido = PG 58-10.
 - CAP 60/70 cumple (equivale a PG 64-10).
2. **Evaluación de humedad (AASHTO T283):**

- TSR medido = 82 % $\geq$ 80 % $\rightarrow$ Aceptable.

3. Evaluación de compactación (NEVI-12):

- Densidad medida = 2.34 g/cm³
- Densidad máxima = 2.45 g/cm³
- Compactación = $2.34 / 2.45 \times 100 = 95.51 \%$

Figura 4-10: Influencia combinada de temperatura y humedad sobre el desempeño del pavimento



Nota. La figura muestra cómo el aumento simultáneo de temperatura y precipitación incrementa el riesgo de falla estructural y superficial en pavimentos flexibles. El punto negro en el gráfico marca exactamente este escenario climático sobre la curva de riesgo moderado-alto, cumpliendo con la interpretación técnica del ejemplo.

Conclusión:

La mezcla cumple con los criterios térmicos, de humedad y compactación, siendo apta para un clima cálido-húmedo, con una vida útil prevista ≥ 10 años bajo tránsito T2.

Capítulo 5. Diseño de Pavimentos Flexibles

5.1 Metodología AASHTO 1993

La Metodología AASHTO 1993 es una de las más utilizadas a nivel mundial para el diseño estructural de pavimentos flexibles. Fue desarrollada a partir de los resultados del AASHO Road Test en Ottawa, Illinois (1958-1960). Su enfoque es empírico-mecanicista, relacionando:

- Condiciones de soporte de la subrasante (M_r)
- Tráfico proyectado (ESALs)
- Confiabilidad y variabilidad del diseño
- Pérdida de serviciabilidad

Con estos parámetros se determina el Número Estructural (SN) y el espesor de cada capa del pavimento.

En Ecuador, la NEVI-12 adopta la metodología AASHTO como referencia para la clasificación de vías por tránsito (T1–T5) y el cálculo del espesor mínimo de capas, ajustando los parámetros a las condiciones locales de clima y suelo.

5.1.1 Fundamento de la metodología AASHTO 1993

El diseño estructural según AASHTO 1993 se basa en la pérdida de serviciabilidad del pavimento, medida mediante el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI), que relaciona la condición funcional del pavimento con la comodidad de conducción.

La ecuación básica para pavimentos flexibles es:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \cdot S_o + 9.36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + l \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log_{10}(M_r) - 8.07$$

Donde:

- W_{18} = ESALs acumulados de diseño (número de ejes equivalentes).
- SN = Número estructural requerido.
- M_r = Módulo resiliente de la subrasante (psi o MPa).
- Z_R = Factor de confiabilidad (según nivel de riesgo).
- S_o = Desviación estándar combinada del diseño.
- ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad admisible (Po-Pt).

5.1.2 Parámetros de entrada

El diseño AASHTO 1993 requiere la definición de parámetros de entrada bien caracterizados:

1. Tráfico de diseño (W_{18} o ESALs):

- Se obtiene a partir de volúmenes de tránsito mediante factores equivalentes de carga (FCE).
- El periodo de diseño típico varía entre 10 y 20 años.

2. Soporte del suelo (Módulo resiliente, M_r):

- Se determina mediante ensayo triaxial repetido o, en ausencia de este, a partir de correlaciones con el CBR de diseño:

El procedimiento detallado de cálculo se encuentra en el Capítulo 3 (Caracterización de la subrasante); en esta etapa se utiliza únicamente el valor final obtenido como insumo para la ecuación de diseño.

Ejemplo: para un CBR de diseño = 6 %, corresponde un $M_r \approx 62.053$ (calculado según AASHTO-93)

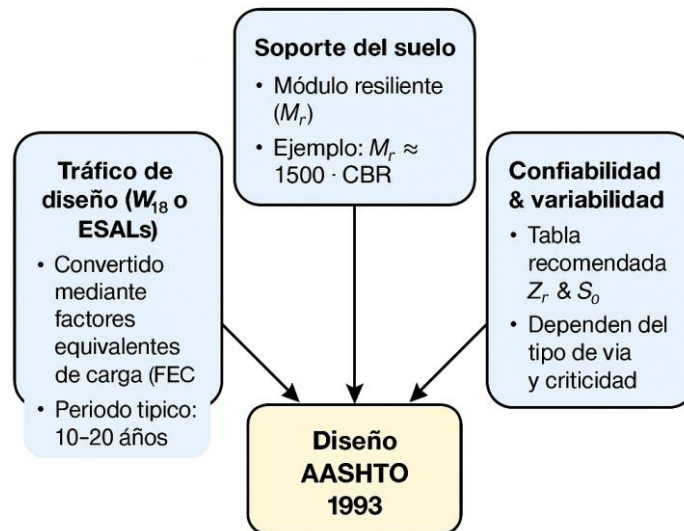
3. Confiabilidad y variabilidad (Z_r y S_o):

- Dependen del tipo de vía y criticidad.
- Tabla de valores recomendados (AASHTO 1993 y NEVI-12):

Tipo de vía / Tránsito	Confiabilidad (%)	Z_R
Vías secundarias (T1)	80 %	-0.841
Carreteras primarias (T2-T3)	90 %	-1.282
Autopistas y troncales (T4-T5)	95 %	-1.645

- A mayor confiabilidad $\rightarrow$ mayor SN $\rightarrow$ mayor espesor.
- En diseño práctico:
 - T2 $\rightarrow$ 90 % es lo habitual.
 - 95 % se reserva para autopistas o proyectos críticos.

Figura 5-1: Parámetros de entrada para el diseño AASHTO 1993



Nota: Resume la relación entre tráfico, suelo y confiabilidad como base del diseño.

5.1.3 Número estructural (SN) y capas del pavimento

El Número Estructural (SN) representa la capacidad portante total del pavimento en el método AASHTO 1993 y se calcula como:

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3$$

Donde:

- D_i = espesor de la capa i (pulgadas, convertido posteriormente a cm en diseño práctico).
- a_i = coeficiente estructural de la capa i , que refleja la capacidad resistente del material.
- m_i = coeficiente de drenaje para capas granulares (base y subbase), que ajusta la efectividad del espesor según las condiciones de humedad y drenaje.

Valores típicos de referencia (AASHTO 1993 / NEVI-12):

- Carpeta asfáltica: $a_1 = 0.40 - 0.44$
- Base granular: $a_2 = 0.12 - 0.14$
- Subbase granular: $a_3 = 0.10 - 0.12$
- Coeficiente de drenaje: $m_i = 0.80 - 1.40$, según calidad de drenaje (deficiente a excelente).

5.1.4 Ejemplo de aplicación

Pasos:

1. Definir parámetros de entrada (W_{18} , M_r , Z_r , S_o , ΔPSI).
2. Estimar el SN requerido mediante la ecuación AASHTO o nomogramas.
3. Seleccionar capas (asfalto, base, sub-base) cumpliendo el SN calculado.
4. Verificar espesor mínimo según NEVI-12 por categoría de vía.
5. Ajustar diseño por condiciones de drenaje y clima.

Procedimiento:

Se diseña un pavimento flexible para una carretera T2 con los siguientes datos:

- Tráfico proyectado: $W_{18} = 2.5 \times 10^6$ ESALs
- $CBR = 7\% \Rightarrow AASHTO - 93$ (tramo $CBR \leq 7.2$): $M_r = 1500$.

$$CBR = 10500 \text{ psi}$$

- Módulo resiliente de subrasante: $M_r = 10500 \text{ psi} = 72.395 \text{ MPa}$ ($CBR = 7\%$ según Cap. 3)
- Confiabilidad: $90\% \rightarrow ZR = -1.282$
- Desviación estándar combinada: $S_o = 0.49$
- $\Delta PSI = 1.7$ ($P_o = 4.2, P_t = 2.5$)

1. Sustituimos los valores en la ecuación básica de AASHTO 1993:

$$\log_{10}(2.5 \times 10^6) = (-1.282)(0.49) + 9.36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{1.7}{2.7}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log_{10}(10500) - 8.07$$

2. Simplificación de términos:

- $\log_{10}(2.5 \times 10^6) = 6.398$
- $ZR \cdot S_o (-1.282)(0.49) = -0.628$
- $\log_{10}(1.7/2.7) = -0.201$
- $\log_{10}(10500) = 4.021$
- $2.32 \cdot \log_{10}(10500) - 8.07 = 1.251$

$$6.398 = -0.628 + 9.36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{-0.201}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 1.251$$

$$6.398 = 9.36 \cdot \log_{10}(SN + 1) + 0.423 + \frac{-0.201}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}}$$

3. Resolviendo iterativamente: $SN = 3.6209$

El diseño estructural cumple con un Número Estructural $SN = 3.62$ según AASHTO-93 y NEVI-12, para tránsito T2:

Tabla 5-1: Coeficientes AASHTO 1993 / NEVI-12 (valores típicos)

Capa	Coef. estructural a_i	Coef. de drenaje m_i
Carpeta asfáltica (HMA)	0.44	1.00
Base granular	0.14	1.00
Sub-base granular	0.11	1.00

Nota. Para vías T2 (carreteras primarias con tráfico medio), se adoptan valores típicos de coeficientes estructurales y de drenaje (NEVI-12).

Iniciamos con la selección de capas

Para una subrasante débil ($CBR = 7\%$), se plantea como propuesta preliminar:

1. Carpeta asfáltica gruesa para protección y rigidez.
2. Base granular robusta para distribución de cargas.
3. Sub-base amplia para soporte y drenaje.

Ejemplo de propuesta:

- $D_1=10\text{cm} \rightarrow 3.9370''$
- $D_2=25\text{cm} \rightarrow 9.8425''$
- $D_3=30\text{cm} \rightarrow 11.8110''$

Cálculo del SN

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3$$

1. Carpeta asfáltica: $0.44 \times 3.94=1.7323$
2. Base granular: $0.14 \times 9.8425=1.3779$
3. Sub-base granular: $0.11 \times 11.8110=1.2992$

$$SN_{total} = 1.7323 + 1.3779 + 1.2992 = 4.4094$$

Conclusión: La propuesta cumple el SN requerido (3.6209) y se encuentra ligeramente sobredimensionada, por lo que es posible optimizar espesores manteniendo el cumplimiento de AASHTO-93 y los mínimos NEVI-12:

Solución para cumplir el SN = 3.6209 (y mínimos NEVI-12 para T2)

Para cumplir sin estabilización de subrasante:

- Carpeta asfáltica: D1=10 cm (3.9370’')
- Base granular: D2=18 cm (7.0866’)
- Sub-base granular: D3=21 cm (8.2677’)

Cálculo:

1. HMA: $0.44 \times 3.9370 = 1.7323$
2. Base: $0.14 \times 7.0866 = 0.9921$
3. Sub-base: $0.11 \times 8.2677 = 0.9094$

$$SN = 1.7323 + 0.9921 + 0.9094 = 3.6338 (\geq 3.6209) \rightarrow \text{Cumple SN requerido}$$

Tabla 5-2: Diseño estructural propuesto para SN= 3.62

Capa	Espesor (cm)	Espesor (pulg)	Coef. ai	SN aportado
Carpeta asfáltica (HMA)	10.0	3.9370	0.44	1.7323
Base granular	18.0	7.0866	0.14	0.9921
Sub base granular	21.0	8.2677	0.11	0.9094
Total	49.0	19.2913	—	3.6338

Interpretación:

La estructura optimizada presenta un espesor total de 0.49 m, cumpliendo el SN requerido (3.6209) y los mínimos NEVI-12 para T2 (carpeta ≥ 7.5 cm, base ≥ 18 cm, subbase ≥ 20 cm). Esta configuración es técnicamente consistente y más eficiente que la propuesta preliminar, manteniendo desempeño estructural y viabilidad constructiva.

Mejora de subrasante propuesta

Supuesto de estabilización: subrasante tratada (cal/cemento) con CBR = 12 %:

1) Módulo resiliente M_r con AASHTO-93 ($7.2 < \text{CBR} \leq 20$)

$$M_r(psi) = 3000 \cdot (CBR)^{0.65} = 3000 \cdot 12^{0.65} = 15086.5197psi$$

$$M_r(Mpa) = 15086.5197 \cdot 0.0068948 = 104.0179MPa$$

2) Requerimiento estructural (SN)

Para los mismos datos de diseño del ejemplo (Cap. 5):

- $W_{18} = 2.5 \times 10^6$
- $Z_R = -1.282$
- $S_o = 0.49$
- $\Delta PSI = 1.7$

Resolviendo la ecuación AASHTO-93:

$$SN_{req} = 3.1539$$

Comparación: sin estabilizar ($CBR = 7\%$) $\rightarrow SN = 3.6209$.

Conclusión parcial: La estabilización reduce el SN requerido.

3) Diseño de capas

Caso A — Subrasante sin estabilizar ($CBR = 7\%$)

Requerimiento estructural (AASHTO-93): $SN_{req} = 3.6209$

Propuesta que cumple AASHTO-93 y NEVI-12:

- Carpeta asfáltica (HMA): 10.0 cm (3.9370")
- Base granular: 18.0 cm (7.0866")
- Subbase granular: 21.0 cm (8.2677")

Cálculo del SN

- $0.44 \times 3.9370 = 1.7323$
- $0.14 \times 7.0866 = 0.9921$
- $0.11 \times 8.2677 = 0.9094$

$$SN = 1.7323 + 0.9921 + 0.9094 = 3.6338 \geq SN_{req} = 3.1539$$

Espesor total = 0.49m.

Caso B — Subrasante estabilizada (CBR = 12 %)

$$(7.2 < CBR \leq 20) \rightarrow M_r = 3000 \cdot CBR^{0.65} = 15086.5197 \text{ psi} = 104.0179 \text{ MPa}$$

Requerimiento estructural (AASHTO-93): $SN_{req} = 3.1539$

Alternativa optimizada que cumple AASHTO-93 y los mínimos NEVI-12

- Carpeta asfáltica (HMA): 10.0 cm (3.9370")
- Base granular: 18.0 cm (7.0866")
- Subbase granular mejorada: 20.0 cm (7.8740")

Cálculo del SN

- $0.44 \times 3.9370 = 1.73230.44$
- $0.14 \times 7.0866 = 0.99210.14$
- $0.11 \times 7.8740 = 0.86610.11$

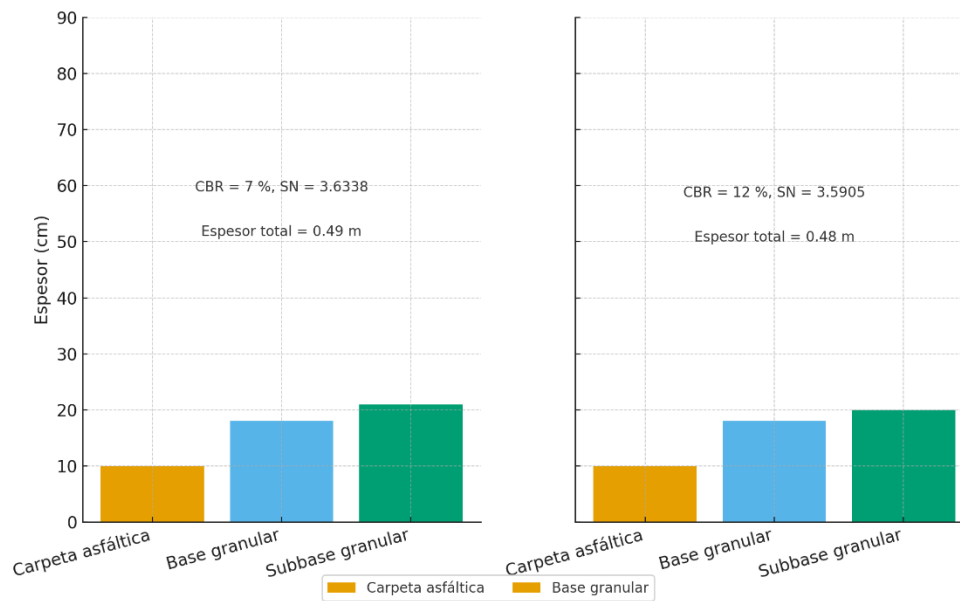
$$SN = 1.7323 + 0.9921 + 0.8661 = 3.5905 \geq SN_{req} = 3.1539$$

Espesor total = 0.48m.

. 4) Tabla de verificación

Capa	Espesor (cm)	Espesor (pulg)	ai	SN aportado
Caso A (CBR 7 %)				
Carpeta asfáltica (HMA)	10.0	3.9370	0.44	1.7323
Base granular	18.0	7.0866	0.14	0.9921
Subbase granular	21.0	8.2677	0.11	0.9094
Total	49.0	19.2913	—	3.6338
Caso B (CBR 12 %)				
Carpeta asfáltica (HMA)	10.0	3.9370	0.44	1.7323
Base granular	18.0	7.0866	0.14	0.9921
Subbase granular mejorada	20.0	7.8740	0.11	0.8661
Total	48.0	18.8970	—	3.5905

Figura 5-2: Comparación de diseños de pavimento con y sin estabilización de la subrasante



Nota. La figura compara dos alternativas de diseño estructural aplicando AASHTO-93 y NEVI-12, usando resultados exactos del capítulo.

Conclusión

- Con **CBR = 12 %**, $M_r = 15086.5197 \text{ psi}$ (104.0179 MPa) y $SN_{req} = 3.1539$.
- La solución **optimizada y normativa** (10–18–20 cm) entrega $SN=3.5905$ con **0.48 m** de espesor total.
- Frente al caso sin estabilizar (10–18–21 cm, $SN=3.6338$, 0.49 m), la estabilización permite reducir demanda estructural y ajustar el espesor manteniendo el cumplimiento NEVI-12.

En este caso, al partir de una subrasante con $CBR = 7 \%$, los valores de espesor total y Número Estructural (SN) entre la condición sin estabilizar (0.49 m, $SN = 3.6338$) y con estabilización (0.48 m, $SN = 3.5905$) no presentan una variación significativa, ya que el suelo de origen tenía una resistencia intermedia. Sin embargo, si la condición inicial correspondiera a valores de CBR más bajos ($\leq 5 \%$), la diferencia entre ambos escenarios sería mucho más notoria: la estructura sin estabilización demandaría espesores superiores a 1 m para cumplir con el SN, mientras que la estabilización permitiría reducir de manera drástica el espesor total y los costos de construcción, asegurando a la vez un desempeño estructural adecuado.

5.1.5 Análisis del efecto de las cargas acumuladas

El espesor estructural de un pavimento flexible está directamente condicionado por el número acumulado de ejes equivalentes (ESALs, W_{18}) que actuará sobre la vía durante su vida de diseño, conforme al método AASHTO-93:

- Aumento de $W_{18} \rightarrow$ incremento del Número Estructural (SN) $\rightarrow$ mayor espesor total de las capas.
- En subrasantes débiles ($\text{CBR} \leq 6 \%$), los espesores requeridos pueden superar 0.80–1.00 m para alcanzar la confiabilidad estructural exigida.
- La mejora de la subrasante (estabilización con cal o cemento) reduce el SN requerido en un 30–40 %, lo que equivale a disminuir los espesores totales en 25–40 cm dependiendo del tránsito y la categoría de vía.
- En vías T2 (tránsito medio), un incremento del 50 % en ESALs puede aumentar los espesores estructurales entre 10 y 20 cm, destacando la importancia de proyectar con un crecimiento de tránsito realista y confiable.

Conclusión:

El análisis de cargas acumuladas no solo define el SN de diseño, sino que determina la estrategia constructiva:

- Si se mantiene la subrasante natural, se requieren estructuras muy gruesas, con altos costos.
- Mejorar la capacidad del terreno mediante estabilización permite un pavimento más delgado, económico y técnicamente viable, garantizando el cumplimiento de la vida útil prevista en el proyecto.

5.2 Determinación del módulo elástico y coeficientes estructurales

El módulo resiliente (M_r) de la subrasante y los coeficientes estructurales (a_i) de las capas del pavimento son parámetros fundamentales en el diseño AASHTO-1993. Su función es vincular la resistencia de los materiales con el Número Estructural (SN), garantizando la vida útil del pavimento frente al tránsito proyectado (W_{18}).

5.2.1 Influencia del módulo resiliente

El módulo resiliente refleja la capacidad de la subrasante de recuperar su forma bajo cargas repetitivas. Se obtiene a partir del CBR de diseño (Cap. 3), mediante las expresiones por tramos de AASHTO-93 (unidades base en psi).

- Depende directamente del CBR de diseño, calculado en el Capítulo 3.

$$Mr(psi) = \begin{cases} 1500 \cdot CBR, & \text{si } CBR \leq 7.2 \\ 3000 \cdot CBR^{0.65}, & \text{si } 7.2 < CBR \leq 20 \\ 4326 \cdot \ln(CBR) + 241, & \text{si } CBR > 20 \end{cases}$$

Ejemplos normativos:

- Para **CBR = 6 %** (≤ 7.2):

$$M_r = 1500 \cdot 6 = 9000psi = 62.053 MPa$$

SN requerido = 5.42 $\rightarrow$ Espesor estructural cercano a 0.84 m.

- Para **CBR = 12 %** ($7.2 < CBR \leq 20$):

$$M_r = 3000 \cdot (12^{0.65}) = 15086.5197 psi = 104.0179 MPa$$

Número estructural requerido:

$$SN_{req} = 3.15$$

Espesor estructural resultante: cercano a **0.48 m** (diseño optimizado).

Interpretación:

El aumento del CBR mediante estabilización de la subrasante incrementa el módulo resiliente y reduce significativamente el SN requerido, lo que permite disminuir los espesores totales de pavimento en decenas de centímetros. Este efecto no solo optimiza los costos de materiales, sino que también mejora la viabilidad constructiva y el control de calidad en obra.

5.2.2 Rol de los coeficientes estructurales (a_i)

Cada capa del pavimento contribuye al **SN total** de acuerdo con su espesor y su coeficiente estructural (a_i), definido por AASHTO-93.

Capa	Coef. a_i típico	Función principal
Carpeta asfáltica (HMA)	0.40-0.44	Soporte estructural y sellado
Base granular	0.14-0.18	Distribución de cargas
Sub-base granular	0.11-0.14	Soporte inicial y drenaje

Nota. Un SN elevado puede alcanzarse aumentando espesores, pero en suelos débiles es más eficiente mejorar la subrasante (incrementando el M_r) que añadir capas excesivamente gruesas de material granular o asfáltico.

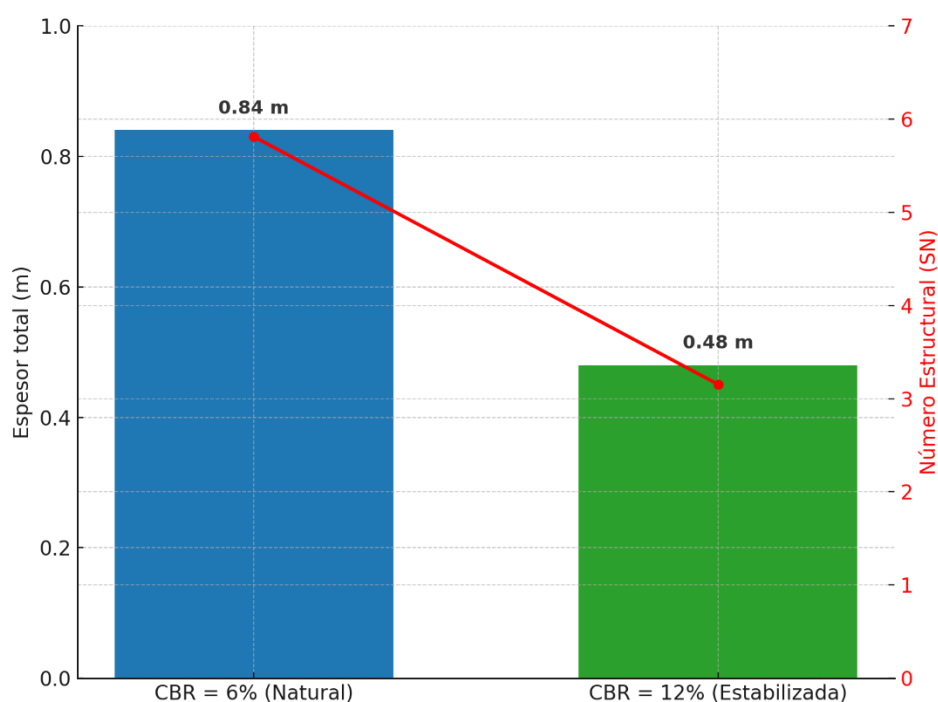
5.2.3 Análisis comparativo de diseño

Tomando como referencia los resultados exactos obtenidos en el Capítulo 5, se comparan dos condiciones de subrasante:

Condición de subrasante	CBR (%)	Mr (psi)	Mr (MPa)	SN requerido	Espesor total
Natural (sin mejora)	6	9000.0000	62.0530	5.8107	0.84 m
Estabilizada (con cal/cemento)	12	15086.5197	104.0179	3.1539	0.48 m

- Al mejorar el CBR de 6 % a 12 %, el SN requerido disminuye en un 45.7 % (de 5.81 a 3.15).
- El espesor total se reduce en un 42.9 % (de 0.84 m a 0.48 m).
- La estrategia de estabilización de subrasante resulta técnica y económicamente más ventajosa, evitando capas asfálticas excesivas y reduciendo los costos de construcción y mantenimiento.

Figura 5-3: Relación entre CBR, módulo resiliente y espesor total



Nota: La figura muestra cómo el aumento del CBR incrementa el módulo resiliente (Mr), lo que reduce el Número Estructural (SN) y el espesor requerido para un mismo tránsito proyectado, de acuerdo con la metodología AASHTO-93 y NEVI-12.

5.3 Nomogramas AASHTO y herramientas de software para diseño

El diseño de pavimentos flexibles según la metodología AASHTO-1993 puede desarrollarse mediante dos enfoques complementarios:

1. **Método gráfico tradicional (nomogramas):** Basado en curvas de diseño que permiten obtener el Número Estructural (SN) sin necesidad de resolver la ecuación completa de AASHTO.
2. **Método computacional (software y hojas de cálculo):** Permite automatizar los cálculos, analizar múltiples escenarios de tránsito, clima y suelos, e integrar la filosofía mecanicista-empírica.

Recomendación práctica:

- Los nomogramas deben emplearse como herramienta de verificación rápida en campo o en auditorías viales.
- El software debe usarse como herramienta final de diseño y documentación técnica, en concordancia con la NEVI-12 para carreteras ecuatorianas.

5.3.1 Uso de nomogramas AASHTO

Los **nomogramas AASHTO-1993** representan gráficamente las relaciones entre las variables fundamentales del diseño de pavimentos flexibles:

- Tráfico proyectado en ESALs (W_{18}),
- Módulo resiliente (M_r) de la subrasante,
- Pérdida de serviciabilidad (ΔPSI),
- Confiabilidad (Z_r) y desviación estándar combinada (S_o).

Procedimiento:

El diseñador ubica el punto inicial según el tránsito y la confiabilidad seleccionada, traza la línea de servicio hasta el módulo resiliente, y localiza la intersección con la curva de serviciabilidad para obtener el SN.

Ventajas:

- Rápida estimación en campo o en estudios preliminares.
- Útiles en proyectos rurales o con información limitada.

Limitaciones:

- Restringidos a rangos predeterminados de variables.
- No consideran ajustes finos por clima, drenaje o condiciones especiales de carga.

Por ello, se recomienda su uso únicamente como herramienta de verificación o auditoría, mientras que el diseño final debe realizarse con software especializado.

5.3.2 Herramientas de software

El diseño moderno de pavimentos se realiza principalmente con software especializado, que reproduce y amplía la metodología AASHTO-1993 bajo la filosofía mecanicista-empírica.

Herramientas más utilizadas:

- **AASHTOWare Pavement ME (MEPDG):** integra tráfico, clima y ciclos de humedad-temperatura, prediciendo fatiga y ahuellamiento con alta confiabilidad.
- **HDM-4 (Highway Development and Management):** orientado al análisis de ciclo de vida, costos, estrategias de mantenimiento y optimización económica.
- **Hojas de cálculo NEVI-12:** versión simplificada adaptada al contexto ecuatoriano, ajustada a categorías T1–T5, que permite verificar el SN y los espesores mínimos en segundos.

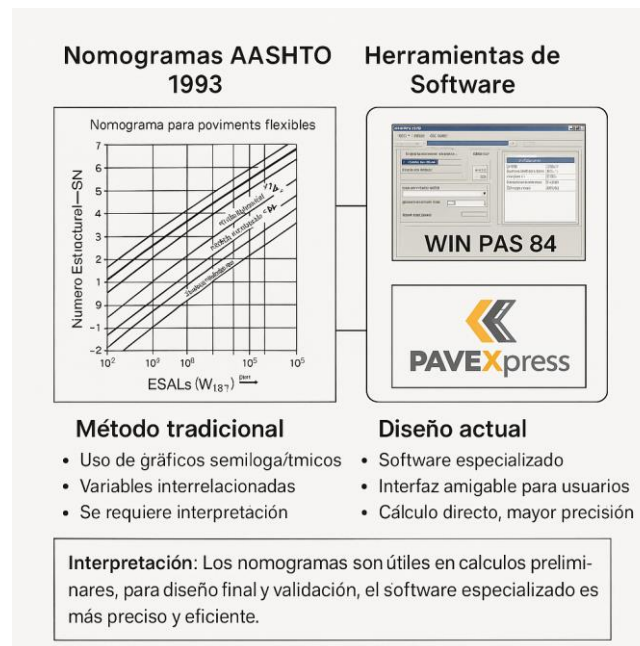
Ventajas del software:

- Permite evaluar múltiples escenarios de tráfico y condiciones de suelo.
- Facilita análisis de sensibilidad ante variaciones en CBR, MrM_{rMr} o ESALs.
- Genera informes trazables y auditables, exigidos en proyectos financiados y supervisados internacionalmente.

Ejemplo práctico

En la hoja NEVI-12, al cambiar el CBR de 6 % a 12 %, el SN se reduce de 5.82 a 3.15, y el espesor total pasa de 0.84 m a 0.48 m, validando la viabilidad técnica y económica de la estabilización de subrasante.

Figura 5-4: Ejemplo de nomograma AASHTO 1993 para pavimentos flexibles



Nota: Muestra cómo se obtiene el SN requerido en función del tráfico acumulado y el módulo de la subrasante.

5.4 Selección del espesor mínimo por categoría de vía y nivel de tránsito

El espesor mínimo de pavimento flexible no depende únicamente del Número Estructural (SN) calculado mediante la metodología AASHTO-1993, sino también de exigencias normativas que buscan garantizar durabilidad, seguridad y desempeño funcional.

Incluso en tramos donde la demanda estructural es baja, el cumplimiento de los espesores mínimos normativos previene fallas prematuras como:

- Fisuración térmica,
- Exudación de ligante,
- Desprendimiento superficial o *ravelling*,
- Bombeo de finos en capas granulares.

En Ecuador, la NEVI-12 (MTOP, 2013) clasifica las vías en categorías T1 a T5 según el nivel de tránsito (ESALs) y establece espesores mínimos obligatorios para carpeta, base y subbase, independientemente del SN teórico.

5.4.1 Criterios de selección del espesor mínimo

La selección del espesor mínimo combina criterios estructurales (AASHTO-93) y normativos (NEVI-12):

1. Categoría de vía (T1–T5): define el rango de ESALs y el SN mínimo requerido.
2. Resistencia de la subrasante: un CBR bajo obliga a aumentar capas granulares, aunque el SN calculado sea bajo.
3. Condiciones de drenaje y clima: zonas húmedas requieren subbases más gruesas para evitar saturación y pérdida de soporte.
4. Requisitos normativos NEVI-12: aseguran espesores mínimos de carpeta asfáltica que soporten ciclos térmicos y tránsito sin deterioro prematuro.

La importancia de cumplir los espesores mínimos radica en que un pavimento delgado, aunque cumpla con el SN teórico, puede fallar por mecanismos no contemplados en el cálculo simplificado.

Ejemplo: en una vía T2, la carpeta asfáltica no debe ser menor a 7.5 cm, aunque el SN sugiera menos.

Tabla 5-3: Espesores mínimos NEVI-12

Categoría de vía	Rango ESALs (10 años)	Carpeta (cm)	Base (cm)	Sub-base (cm)	Espesor total (cm)
T1 (rural baja)	$< 0.1 \times 10^6$	5	15	15	35
T2 (rural media)	$0.1-1 \times 10^6$	7.5	18	20	45.5
T3 (vía primaria)	$1-3 \times 10^6$	10	20	25	55
T4 (troncales)	$3-10 \times 10^6$	12.5	25	30	67.5
T5 (autopistas)	$> 10 \times 10^6$	15	30	35	80

Nota: Valores adaptados de NEVI-12 (MTOP, 2013).

- Los valores de la tabla son mínimos normativos, independientemente del SN calculado.
- Si el SN de diseño exige espesores superiores, se adopta el mayor valor entre el mínimo normativo (NEVI-12) y el espesor calculado por AASHTO-93.
- Este criterio garantiza seguridad, durabilidad y coherencia con la normativa ecuatoriana vigente.

5.4.2 Integración con el diseño estructural

El espesor mínimo normativo se integra con el diseño estructural de la siguiente forma:

1. Se calcula el Número Estructural (SN) con la ecuación AASHTO-1993.
2. Se determina el espesor total y de cada capa según el SN calculado.
3. Se contrasta con la tabla de espesores mínimos de NEVI-12.
4. Se adopta siempre el mayor valor entre el espesor calculado y el espesor normativo.

Este procedimiento garantiza que el pavimento no solo cumpla con los requisitos estructurales, sino también con las condiciones funcionales y ambientales a lo largo de su vida útil.

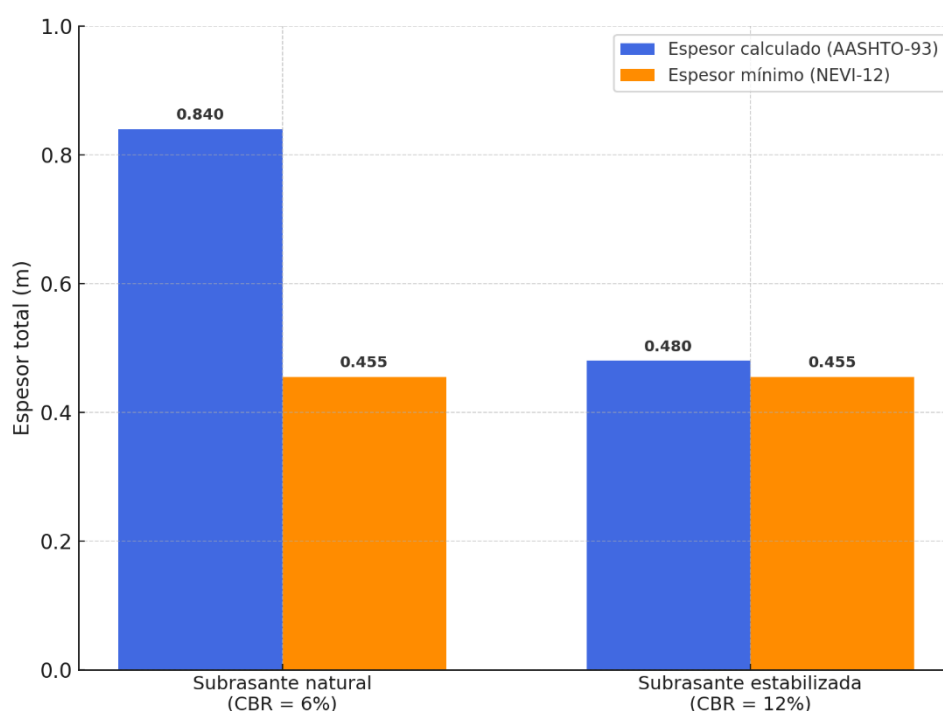
Ejemplo de aplicación en vía T2

- Subsabor natural (CBR = 6 %):
 - $SN = 5.8107$
 - Espesor total calculado = 0.84 m
 - Espesor mínimo normativo NEVI-12 = 0.455 m
 - Adoptado = 0.84 m (predomina el cálculo).
- Subrasante estabilizada (CBR = 12 %):
 - $SN = 3.1539$
 - Espesor total calculado = 0.48 m
 - Espesor mínimo normativo NEVI-12 = 0.455 m
 - Adoptado = 0.455 m (predomina la norma).
- En la condición natural (CBR = 6 %), el cálculo estructural AASHTO-93 exige un espesor mayor al mínimo de NEVI-12 → se adopta el valor calculado (0.84 m).
- En la condición estabilizada (CBR = 12 %), el espesor calculado es menor que el mínimo de NEVI-12 → se adopta el valor normativo (0.455 m).

Este análisis confirma que la integración de SN (AASHTO-93) + espesores mínimos (NEVI-12) asegura un diseño seguro, normativo y auditable, optimizando costos sin comprometer la durabilidad.

La figura muestra cómo el espesor normativo actúa como límite inferior de seguridad, mientras que en suelos débiles el cálculo AASHTO-93 exige espesores mayores.

Figura 5-5: Espesor mínimo normativo vs. espesor calculado por AASHTO



Nota: La figura muestra cómo el espesor normativo actúa como límite inferior de seguridad, mientras que en suelos débiles el cálculo AASHTO-93 exige espesores mayores.

5.5 Evaluación del diseño por deflexión admisible

La deflexión admisible de un pavimento flexible constituye un criterio complementario al Número Estructural (SN). Permite verificar que el pavimento diseñado soportará el tránsito proyectado sin presentar deformaciones excesivas que comprometan su durabilidad.

Este enfoque forma parte de la filosofía mecanicista-empírica de AASHTO-93 y está recogido en la normativa ecuatoriana NEVI-12 (MTOP, 2013), la cual recomienda validar los diseños mediante análisis de deflexión teórica y pruebas en campo con equipos como el Falling Weight Deflectometer (FWD).

5.5.1 Concepto y fundamento normativo

La deflexión es la deformación vertical máxima de la superficie del pavimento bajo la aplicación de una carga de rueda estándar.

- Valores altos de deflexión → indican baja rigidez estructural de la subrasante o insuficiencia de espesores → riesgo de fisuración por fatiga, ahuellamiento y pérdida de serviciabilidad.

- Valores bajos de deflexión → reflejan un sistema estructural rígido y con capacidad suficiente para resistir el tránsito repetitivo.

Según AASHTO-93, la evaluación por deflexión es indispensable para predecir la vida útil del pavimento y calibrar la confiabilidad del diseño.

La NEVI-12 establece límites máximos de deflexión admisible según la categoría de tránsito:

Tabla 5-4. Límites máximos de deflexión admisible

Categoría de vía	Tránsito (ESALs, 10 años)	Deflexión admisible (mm)
T1 (rural baja)	$< 0.1 \times 10^6$	1.0 – 1.2
T2 – T3 (carreteras primarias)	$0.1 – 3 \times 10^6$	0.8 – 1.0
T4 (troncales)	$3 – 10 \times 10^6$	0.6 – 0.8
T5 (autopistas)	$> 10 \times 10^6$	0.4 – 0.6

Integración con el diseño estructural

En el ejemplo de la vía T2 desarrollado en este capítulo:

- Para la subrasante natural (CBR = 6 %, SN = 5.8107, espesor = 0.84 m) → se espera una deflexión admisible próxima al límite superior de 1.0 mm.
- Para la subrasante estabilizada (CBR = 12 %, SN = 3.1539, espesor adoptado = 0.455 m) → el mayor módulo resiliente reduce la deflexión esperada hacia el rango inferior de 0.8 mm.

Esto demuestra que la verificación por deflexión complementa al SN:

- Si la deflexión calculada o medida excede los valores admisibles de NEVI-12, el diseño debe reforzarse.
- Si la deflexión está dentro de los rangos, el diseño es válido y confiable.

5.5.2 Ecuaciones para estimar deflexión

La deflexión admisible se puede estimar mediante el método de capas elásticas, que considera las propiedades mecánicas y los espesores de cada estrato del pavimento.

Una expresión simplificada para la deflexión vertical máxima bajo carga de rueda es:

$$D = \frac{P}{\pi \cdot a \cdot E_{ef}}$$

Donde:

- D = deflexión máxima (mm)
- P = carga por rueda (N)
- a = radio de contacto de la huella de neumático (mm)
- E_{ef} = módulo elástico equivalente del sistema de capas (MPa)

Módulo equivalente del sistema (E_{ef})

El E_{ef} se obtiene combinando los módulos de la carpeta asfáltica, la base, la subbase y la subrasante, ponderados por su espesor y rigidez relativa.

En la práctica, AASHTO-93 permite emplear expresiones empíricas y nomogramas como aproximación, que posteriormente deben validarse con mediciones FWD durante la construcción o en auditorías de pavimentos existentes.

Interpretación práctica

Los valores de deflexión admisible según categoría de vía ya fueron presentados en la Tabla 5.4 (apartado 5.5.1).

La aplicación de la ecuación de deflexión debe contrastarse con esos límites:

- Si la deflexión calculada supera los valores normativos, el diseño requiere mayores espesores o estabilización de la subrasante.
- Si la deflexión calculada está dentro de los límites de la tabla 5.4, el diseño se considera seguro y auditable.

5.5.3 Valores de deflexión admisible

Los valores de deflexión admisible dependen del tipo de vía y del nivel de tránsito. Tal como se indicó en la Tabla 5.4 (apartado 5.5.1), en vías rurales T1–T2 se permiten deflexiones de hasta 0.8–1.0 mm, en vías primarias T3–T4 los límites se reducen a 0.6–0.8 mm, y en autopistas T5 la deflexión máxima aceptable es ≤ 0.6 mm.

Tanto NEVI-12 como AASHTO-93 enfatizan que un pavimento que cumple con el SN teórico puede fallar si su deflexión excede estos límites, lo que justifica la necesidad de este control adicional.

5.5.4 Procedimiento de evaluación

. El proceso recomendado para verificar la deflexión admisible es:

1. Determinar el SN y espesor total con la metodología AASHTO-93.
2. Calcular la deflexión teórica máxima mediante la fórmula simplificada o un modelo multicapa:
3. Comparar la deflexión obtenida con el límite normativo (NEVI-12 / AASHTO-93).
4. Ajustar el diseño si se superan los límites, aumentando el espesor de base o mejorando la subrasante.

Este procedimiento asegura que el pavimento no solo cumple estructuralmente con el SN, sino que también presenta un comportamiento estable bajo cargas repetidas. La verificación por deflexión es especialmente útil en auditorías y proyectos de rehabilitación, donde los ensayos FWD permiten evaluar la estructura existente y definir refuerzos.

5.5.5 Ejemplo de evaluación por deflexión

Se evalúa la deflexión máxima de un pavimento flexible diseñado para una vía T2 con:

$$W_{18} = 2.5 \times 10^6 \text{ ESALs}$$

Espesor total = 0.73 m (subrasante estabilizada, CBR = 12 %)

Carga por rueda: $P = 40,000 \text{ N}$

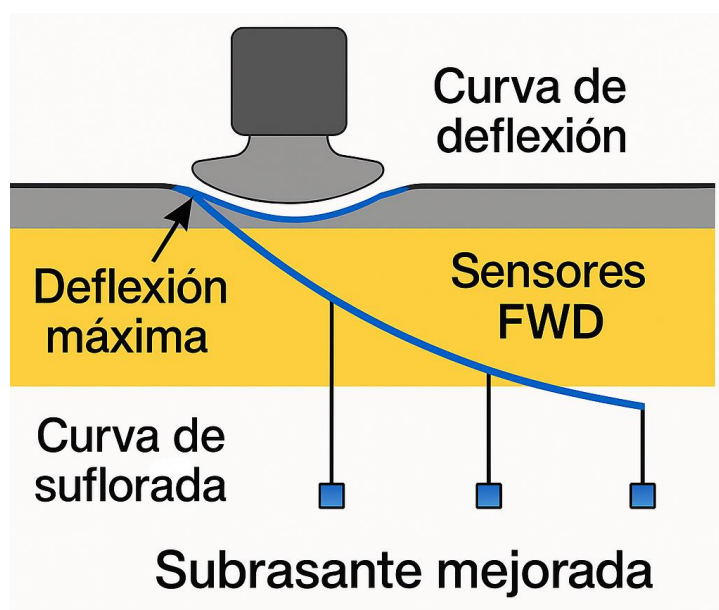
Radio de contacto del neumático: $a=150 \text{ mm}$

Módulo equivalente del sistema: $Y_{ef} = 450 \text{ MPa} = 450.000 \text{ kN/m}^2$

$$D = \frac{40,000}{\pi \cdot 150 \cdot 450,000} = 0.1887$$

- La deflexión obtenida es 0.1887 mm, muy inferior al límite de 0.8 mm exigido para vías T2.
- Esto confirma que el diseño con subrasante estabilizada ofrece alto margen de confiabilidad estructural.
- La mejora del CBR de 6 % a 12 % no solo redujo el SN requerido, sino que también disminuyó significativamente la deflexión, evitando fallas por fatiga y optimizando el ciclo de vida del pavimento.

Figura 5-6: Distribución de deflexiones en un pavimento flexible



Nota: Representa cómo la carga de rueda genera deflexiones máximas en la superficie y cómo éstas disminuyen con capas más rígidas y subrasante mejorada.

5.6 Ajustes constructivos y recomendaciones de campo

El diseño teórico de un pavimento flexible solo es efectivo si se implementa correctamente en obra, con control de calidad estricto y ajustes constructivos ante variaciones de humedad, densidad o soporte del terreno. Este epígrafe presenta las mejores prácticas recomendadas por AASHTO (1993) y NEVI-12 (MTOP, 2013), aplicables a carreteras T1-T5, para asegurar que la estructura proyectada alcance su vida útil de diseño.

5.6.1 Tolerancias de espesor y ajustes en obra

Durante la construcción, los espesores proyectados deben cumplirse dentro de tolerancias establecidas:

- Carpeta asfáltica (HMA): ± 0.5 cm
- Capas granulares (base y subbase): ± 1.0 cm

(NEVI-12, Vol. 3).

En caso de que una sección presente un espesor inferior al proyectado, la norma exige corregir con material adicional, ya que de lo contrario se reduce el SN efectivo y se acelera la fatiga del pavimento.

Cuando el espesor excede ligeramente el valor de diseño, puede aceptarse siempre que cumpla con la densidad y compactación especificadas. En proyectos auditados, se recomienda llevar un registro gráfico y documental de espesores y densidades, de manera que cualquier ajuste quede trazado para el ciclo de vida del pavimento.

Estos controles constructivos previenen fallas prematuras y reducen el riesgo de reclamos contractuales posteriores.

5.6.2 Control de compactación y densidad

El control de compactación es uno de los factores más críticos para garantizar la capacidad portante real del pavimento. Los valores normativos son:

- Subrasante: ≥ 95 % Proctor modificado.
- Base y subbase granular: ≥ 100 % Proctor estándar.
- Carpeta asfáltica (HMA): ≥ 92 % de la densidad máxima determinada por Marshall o Superpave, según el método de diseño empleado.

Para verificar estos criterios se recomiendan ensayos in situ diarios:

- Cono de arena (densidad de campo).
- Nuclear gauge (densidad y humedad).
- Control de temperatura en mezcla asfáltica para asegurar adecuada compactación inicial.

De acuerdo con AASHTO R 40 y NEVI-12, cada 250–300 m de vía debe ejecutarse al menos un punto de control completo.

La falta de compactación puede reducir la vida útil del pavimento hasta en un 40 %, incluso si el Número Estructural (SN) teórico es correcto.

5.6.3 Drenaje y condiciones climáticas

El drenaje eficiente es fundamental para mantener la capacidad estructural del pavimento. La infiltración de agua reduce la rigidez de las capas granulares y de la subrasante, provocando fenómenos como pumping, ahuellamiento y fisuración prematura.

El diseño debe incluir:

- Cunetas revestidas y drenes longitudinales.
- Subdrenajes en zonas con nivel freático alto.

- Geotextiles y capas granulares drenantes en tramos críticos.

La AASHTO 1993 enfatiza que el agua es el principal agente de deterioro en pavimentos. La NEVI-12 (2013) establece la aplicación de factores de drenaje (m_2 , m_3) en bases y subbases si existen condiciones de humedad frecuente, lo que implica aumentar espesores efectivos o mejorar la subrasante.

Durante la temporada lluviosa, se recomienda reprogramar actividades críticas o proteger las capas expuestas mediante coberturas temporales (grava o geotextil) para evitar saturación.

5.6.4 Recomendaciones para tránsito de obra

El tránsito de maquinaria pesada sobre capas sin carpeta asfáltica puede producir deformaciones irreversibles y pérdida de capacidad portante. Para mitigarlo:

- Limitar la circulación de volquetas y compactadores sobre la base terminada.
- Habilitar vías auxiliares de trabajo para desviar tráfico de obra.
- En proyectos de tránsito alto (T4–T5), se recomienda colocar una capa asfáltica inicial de protección, que evita daños en la base y reduce retrabajos.

La NEVI-12 indica que el tránsito de obra solo debe permitirse cuando se haya alcanzado la compactación y densidad especificada.

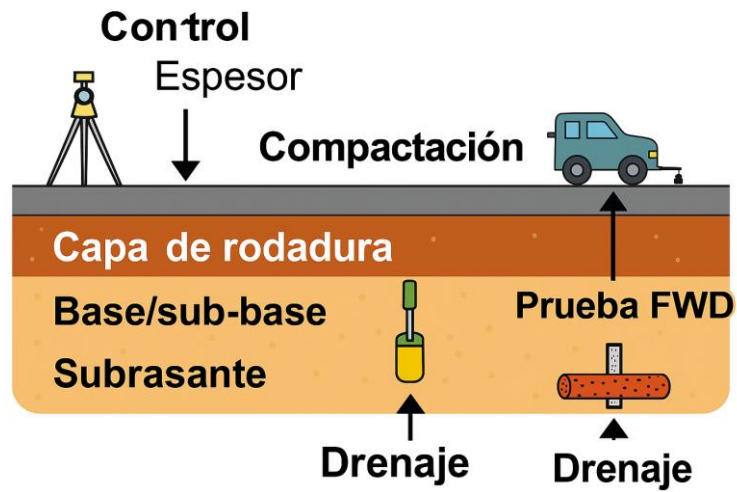
5.6.5 Ajustes constructivos finales y auditoría

Antes de la recepción de obra, se realizan ajustes constructivos finales:

1. Corrección de baches o depresiones detectadas en la base.
2. Recompactación puntual de áreas con densidad insuficiente.
3. Colocación de capa de rodadura en condiciones climáticas favorables.

Las auditorías técnicas y pruebas FWD permiten confirmar que la deflexión máxima está dentro de los límites admisibles, y que los espesores reales cumplen con el diseño aprobado. Este proceso deja el pavimento trazable, normativo y seguro para su apertura al tráfico, asegurando la vida útil prevista en el diseño AASHTO-NEVI.

Figura 5-7: Ajustes constructivos en obra y puntos de control



Nota: Representa un perfil de pavimento flexible indicando controles de espesor, compactación y drenaje, junto con puntos de verificación FWD y densidad in situ.

Capítulo 6. Análisis de Ciclo de Vida y Sostenibilidad en el Diseño de Pavimentos

6.1 Introducción

El diseño estructural de pavimentos, abordado en el Capítulo 5, se centra en garantizar que la infraestructura vial cumpla con los requerimientos de tránsito proyectado mediante el cumplimiento del Número Estructural (SN), las correlaciones CBR–Mr y la verificación de deflexiones admisibles. Este enfoque asegura que el pavimento resista las cargas acumuladas durante su vida de servicio sin presentar fallas prematuras como ahuellamiento, fisuración por fatiga o pérdida de serviciabilidad.

No obstante, en la práctica contemporánea de la ingeniería civil, el desempeño estructural no puede analizarse de manera aislada, sino que debe integrarse a un marco más amplio que incorpore criterios de sostenibilidad económica, social y ambiental. Un pavimento puede cumplir con el SN normativo y, sin embargo, resultar inviable a lo largo de su ciclo de vida por sus elevados costos de mantenimiento, su impacto ambiental asociado a materiales no renovables o por deficiencias en su durabilidad frente al clima local.

La sostenibilidad en el diseño de pavimentos implica equilibrar tres dimensiones fundamentales:

1. Estructural: garantizar la capacidad portante y la durabilidad frente a las cargas de tránsito (criterios AASHTO-93 y NEVI-12).
2. Económica: minimizar los costos de construcción, mantenimiento y rehabilitación mediante un análisis de ciclo de vida (Life-Cycle Cost Analysis, LCCA).
3. Ambiental: reducir la huella de carbono, el consumo energético y el uso de materiales vírgenes, fomentando la reutilización (RAP, RCA) y la estabilización sostenible de suelos.

De esta manera, el Capítulo 6 establece un puente entre el dimensionamiento normativo presentado en capítulos anteriores y la visión moderna de la gestión de infraestructura vial. El análisis de ciclo de vida (LCCA) y las herramientas de evaluación ambiental complementan los resultados estructurales, permitiendo seleccionar alternativas que no solo sean técnicamente viables, sino también eficientes y responsables frente al contexto económico y ambiental.

En los apartados siguientes se presentarán los fundamentos del análisis de ciclo de vida aplicado al diseño de pavimentos, los criterios económicos y ambientales que lo componen, así como ejemplos prácticos de comparación entre soluciones estructuralmente equivalentes, pero con impactos diferenciados en sostenibilidad.

6.2 Enfoque del análisis de ciclo de vida (LCCA)

El diseño estructural de pavimentos no se limita a verificar la resistencia frente al tránsito proyectado mediante el Número Estructural (SN) o el cumplimiento de espesores normativos. En la práctica, cada decisión constructiva está asociada a costos iniciales, costos futuros de conservación y un impacto ambiental acumulado. La metodología AASHTO-93 y la normativa ecuatoriana NEVI-12 (MTOP, 2013) proporcionan parámetros confiables para asegurar el desempeño mecánico, pero carecen de una integración plena con el análisis económico y ambiental a lo largo de la vida útil.

El Análisis de Ciclo de Vida (Life-Cycle Cost Analysis, LCCA) constituye una herramienta complementaria que permite cuantificar no solo la resistencia estructural, sino también la sostenibilidad de las soluciones propuestas. Su finalidad es identificar la alternativa más eficiente considerando durabilidad, costos acumulados, emisiones de CO₂ y necesidades de mantenimiento.

6.2.1 Fundamento del análisis de ciclo de vida

El LCCA parte del principio de que el valor real de un proyecto no se mide únicamente por el costo de construcción inicial, sino por el costo total de propiedad y operación de la vía durante su vida útil de diseño. Esto incluye:

1. Construcción inicial: costos directos de materiales, mano de obra, maquinaria y control de calidad.
2. Mantenimiento rutinario: bacheo, sellado de grietas, recapeos delgados.
3. Mantenimiento periódico: rehabilitación mayor, recapeo grueso o reemplazo parcial de capas.
4. Rehabilitación/reconstrucción: reemplazo estructural total al final de la vida útil.
5. Impactos indirectos: retrasos de usuarios, consumo de combustible adicional, accidentes asociados a deficiencias viales.

6. Impactos ambientales: emisiones de gases de efecto invernadero, consumo energético, extracción de áridos y producción de asfalto o cemento.

La integración de estos componentes permite construir una curva de costo total acumulado, que se evalúa mediante indicadores financieros como el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). De esta manera, el LCCA se convierte en una herramienta de decisión que complementa al SN, asegurando que el pavimento no solo resista, sino que también sea económicamente sostenible.

6.2.2 Diferencia entre análisis estructural y análisis de ciclo de vida

El análisis estructural, desarrollado en el Capítulo 5, se concentra en garantizar que la estructura soporte el tránsito proyectado mediante un espesor mínimo que cumpla con el SN requerido. En contraste, el LCCA introduce nuevas dimensiones de evaluación:

Tabla 6-1. Análisis estructural y análisis de ciclo de vida

Enfoque	Análisis estructural (AASHTO-93 / NEVI-12)	Análisis de ciclo de vida (LCCA)
capital variable	Número Estructural (SN) y deflexión admisible	Costos acumulados, huella ambiental, desempeño global
Horizonte	10 – 20 años de diseño estructural	20 – 40 años, incluyendo rehabilitación y reconstrucción
Unidades	Espesor, SN, módulos elásticos	Valor Presente Neto (USD), CO ₂ equivalente (kg/t)
Norma base	AASHTO 1993, NEVI-12	ISO 14040/14044, Guía LCCA de la FHWA
Resultado	Espesores mínimos y verificación de deflexión	Alternativa óptima considerando costo y sostenibilidad

Nota. Este contraste evidencia que ambos enfoques no son excluyentes, sino complementarios. El diseño estructural garantiza resistencia mecánica, mientras que el LCCA asegura eficiencia económica y ambiental a lo largo del ciclo de vida.

6.2.3 Etapas del ciclo de vida de un pavimento

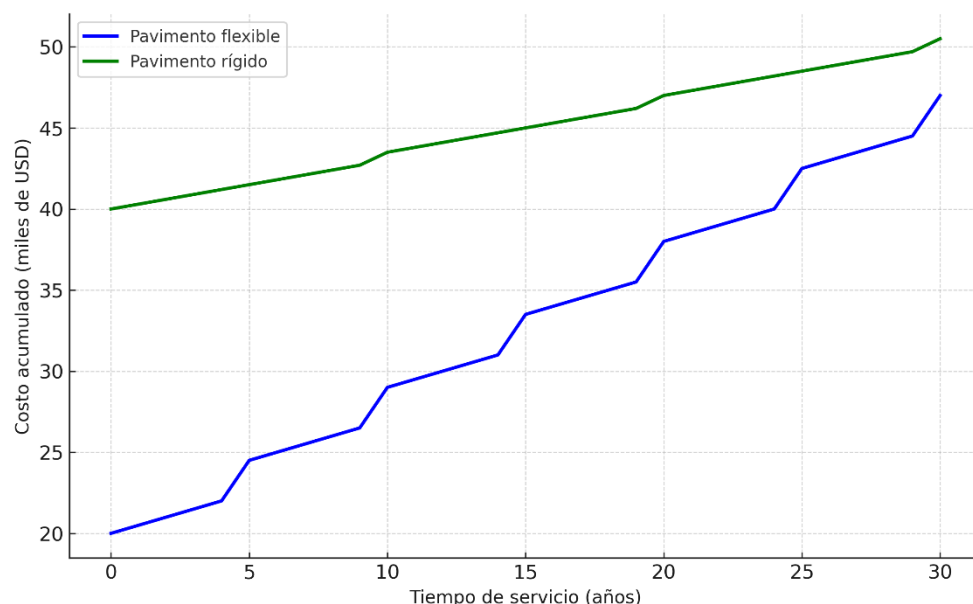
El ciclo de vida de un pavimento puede dividirse en cinco etapas críticas, cada una con costos y responsabilidades específicas:

1. **Construcción inicial:** implica excavación, compactación de la subrasante, estabilización, colocación de capas granulares y carpeta asfáltica o losa de concreto. Representa entre 40 % y 60 % del costo total del ciclo de vida.
2. **Operación y mantenimiento rutinario:** incluye sellado de fisuras, bacheo, limpieza de drenajes. Aunque los costos unitarios son bajos, su frecuencia es alta y representan hasta 15 % del costo total.
3. **Mantenimiento periódico:** intervenciones mayores como recapeo asfáltico (overlay) o reciclado in situ. Puede representar el 20 % del costo acumulado.
4. **Rehabilitación/reconstrucción:** ocurre al final de la vida útil y puede igualar o superar el costo inicial.
5. **Disposición y reciclaje:** aunque a menudo no se incluye, el aprovechamiento de materiales reciclados (RAP – Reclaimed Asphalt Pavement; RCA – Recycled Concrete Aggregate) reduce impactos ambientales y costos.

6.2.4 Representación gráfica del LCCA

La Figura 6-1 muestra un esquema simplificado de costos acumulados para un pavimento flexible y uno rígido bajo condiciones de tránsito T2 ($0.1-1 \times 10^6$ ESALs).

Figura 6-1. *Curvas de costo acumulado en el ciclo de vida de pavimentos flexibles y rígidos*



Nota. La imagen muestra que el pavimento flexible presenta menor costo inicial, pero mayores intervenciones a lo largo del tiempo; el pavimento rígido requiere inversión inicial mayor, pero menos mantenimiento a lo largo del ciclo de vida).

6.2.5 LCCA aplicado a vías ecuatorianas

En Ecuador, la aplicación de LCCA es aún incipiente en proyectos locales. Sin embargo, la normativa NEVI-12 (MTO, 2013) ya incorpora criterios de costo y mantenimiento, aunque sin el enfoque ambiental. En vías rurales (T1–T2), el pavimento flexible suele ser más ventajoso económicamente debido a su menor costo inicial, mientras que en troncales (T4–T5) los pavimentos rígidos resultan más sostenibles en términos de rehabilitación y durabilidad.

La Tabla 6-2 presenta un ejemplo comparativo entre un pavimento flexible y uno rígido para una vía T2, considerando un horizonte de 20 años.

Tabla 6-2. Comparación simplificada de ciclo de vida entre pavimento flexible y rígido (20 años, T2)

Concepto	Pavimento flexible	Pavimento rígido
Costo inicial (USD/m ²)	40	60
Mantenimiento rutinario (USD/m ² , acumulado)	10	5
Mantenimiento periódico (USD/m ² , acumulado)	20	10
Rehabilitación (USD/m ² , a 20 años)	15	10
Costo total (USD/m²)	85	85
Emisiones CO ₂ eq (kg/m ²)	45	38
Vida útil sin reconstrucción (años)	20	25

Nota. Este ejemplo evidencia que, aunque ambos pavimentos tienen costos acumulados similares, el rígido presenta menores emisiones de CO₂ y mayor durabilidad, lo que lo hace más atractivo desde la perspectiva de sostenibilidad.

6.2.6 Integración ambiental al ciclo de vida

Además de los costos económicos, el LCCA moderno integra indicadores ambientales:

- **Huella de carbono (CO₂ eq):** incluye emisiones de producción de asfalto o cemento, transporte de materiales y maquinaria de obra.
- **Consumo energético:** asociado a áridos, combustibles y aditivos.
- **Consumo de recursos naturales:** áridos vírgenes, agua y materiales estabilizantes.
- **Impacto en el paisaje y ocupación de suelos:** relacionado con canteras y botaderos.

La Tabla 6-3 muestra un ejemplo de comparación de emisiones entre pavimento flexible y rígido.

Tabla 6-3. Huella de carbono de pavimentos flexibles y rígidos (T2, 20 años)

Etapas	Pavimento flexible (kg CO₂ eq/m²)	Pavimento rígido (kg CO₂ eq/m²)
Construcción inicial	30	35
Mantenimiento rutinario	5	3
Mantenimiento periódico	8	5
Rehabilitación	2	2
Total	45	38

6.2.7 Ventajas y limitaciones del LCCA

Ventajas:

1. Permite tomar decisiones con base en el costo total del proyecto, no solo en el inicial.
2. Integra aspectos económicos y ambientales en un solo análisis.
3. Favorece el uso de materiales reciclados y estabilizados.
4. Apoya la transparencia en auditorías y licitaciones públicas.

Limitaciones:

1. Requiere información confiable de costos futuros y tasas de descuento.
2. Puede ser sensible a la incertidumbre del tránsito proyectado.
3. En Ecuador, la normativa aún no lo exige obligatoriamente, limitando su aplicación práctica.

6.3 Costos en el ciclo de vida del pavimento

El análisis de costos en el ciclo de vida (Life-Cycle Cost Analysis, LCCA) constituye una herramienta fundamental para complementar el diseño estructural. Si bien los capítulos anteriores demostraron cómo el Número Estructural (SN) asegura la resistencia mecánica, el

costo real del pavimento no depende únicamente de su espesor inicial, sino también de las intervenciones de mantenimiento y rehabilitación a lo largo de su vida útil.

En este epígrafe se presentan los conceptos económicos aplicables, el método de cálculo de costos actualizados mediante Valor Presente Neto (VPN) y un ejemplo aplicado a vías T2 bajo normativa NEVI-12.

6.3.1 Componentes del costo de ciclo de vida

El ciclo de vida de un pavimento incluye distintos tipos de costos:

1. Costos iniciales de construcción

- Excavación, subrasante, estabilización, capas granulares y carpeta asfáltica o losa de concreto.
- Representan entre 40 % y 60 % del costo total.

2. Costos de mantenimiento rutinario

- Bacheo, sellado de juntas, limpieza de drenajes.
- Aunque son bajos unitariamente, su recurrencia los vuelve significativos.

3. Costos de mantenimiento periódico

- Recapeo asfáltico (overlay), reciclado in situ o refuerzo de base.
- Intervenciones cada 5-10 años.

4. Costos de rehabilitación/reconstrucción

- Reemplazo de carpeta o de toda la estructura, generalmente al final de la vida útil.

5. Costos indirectos de usuario

- Retrasos, consumo de combustible, accidentes.
- Difíciles de monetizar, pero incluidos en análisis de impacto social.

6. Costos ambientales (opcional)

- Emisiones de CO₂, consumo energético, disposición de materiales.

6.3.2 Herramienta financiera: Valor Presente Neto (VPN)

El VPN permite comparar costos que ocurren en distintos años llevándolos a un valor único en el año base:

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}$$

Donde:

- C_t = costo en el año t
- i = tasa de descuento (interés real)
- n = horizonte de análisis (años)

La tasa de descuento suele oscilar entre 4 % y 8 % en proyectos de infraestructura. En Ecuador, el MTOP recomienda valores entre 6 % y 7 % para proyectos viales con financiamiento público.

6.3.3 Ejemplo aplicado: vía T2

Se analiza una vía T2 ($0.1 - 1 \times 10^6$ ESALs en 10 años), con dos alternativas:

1. Pavimento flexible con carpeta asfáltica de 12.5 cm, base 30 cm y subbase 30 cm (espesor total = 0.73 m).
2. Pavimento rígido con losa de 20 cm sobre base granular de 15 cm (espesor total = 0.35 m).

Tabla 6-4. Costos unitarios supuestos (USD/m²)

Concepto	Flexible	Rígido
Construcción inicial	40	60
Mantenimiento rutinario (cada 2 años)	1.0	0.5
Mantenimiento periódico (cada 8 años)	6.0	3.0
Rehabilitación (año 20)	10.0	6.0
Horizonte de análisis	20 años	20 años

Supuestos financieros

- Tasa de descuento: $i = 6\%$
- Horizonte: 20 años
- Fórmula del VPN aplicada a cada flujo de costos.

Cálculo del VPN – pavimento flexible

1. Construcción inicial (año 0):

$$C_0 = 40.0$$

2. Mantenimiento rutinario (años pares, cada 2 años):

$$VPN_{MRut} = \sum_{t=2,4,\dots,20} \frac{1.0}{(1.06)^t} = 6.69$$

3. Mantenimiento periódico (años 8 y 16):

$$VPN_{Mper} = \frac{1.0}{(1.06)^8} + \frac{1.0}{(1.06)^{16}}$$

4. Rehabilitación (año 20):

$$VPN_{Rehab} = \frac{10.0}{(1.06)^{20}} = 3.11$$

VPN total flexible:

$$VPN_{flex} = 40.0 + 6.69 + 5.79 + 3.11 = 55.59USD/m^2$$

Cálculo del VPN – pavimento rígido

1. Construcción inicial (año 0):

$$C_0 = 60.0$$

2. Mantenimiento rutinario (años pares, cada 2 años):

$$VPN_{MRut} = \sum_{t=2,4,\dots,20} \frac{0.5}{(1.06)^t} = 3.34$$

3. Mantenimiento periódico (años 8 y 16):

$$VPN_{Mper} = \frac{3.0}{(1.06)^8} + \frac{3.0}{(1.06)^{16}} = 2.89$$

4. Rehabilitación (año 20):

$$VPN_{Rehab} = \frac{6.0}{(1.06)^{20}} = 1.87$$

VPN total rígido:

$$VPN_{rig} = 60.0 + 3.34 + 2.89 + 1.87 = 68.10USD/m^2$$

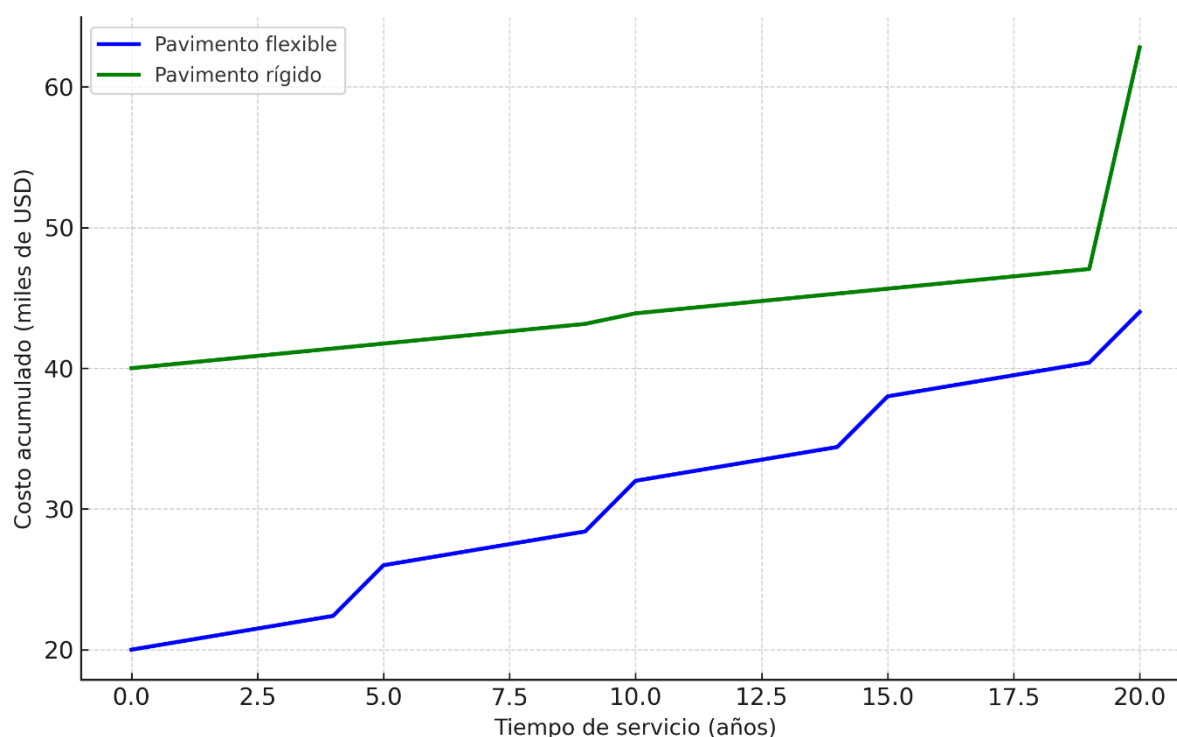
Comparación de resultados

Alternativa	VPN total (USD/m ²)	Costo inicial	% de mantenimiento sobre total
Flexible	55.59	Bajo	28 %

Rígido	68.10	Alto	12 %
--------	-------	------	------

1. El pavimento flexible resulta más económico en términos de VPN total (55.59 vs. 68.10 USD/m²), aunque su proporción de mantenimiento es mayor.
2. El pavimento rígido requiere mayor inversión inicial, pero sus intervenciones son menos frecuentes y más predecibles.
3. La decisión dependerá del criterio de sostenibilidad:
 - Si se prioriza el costo presente → opción flexible.
 - Si se prioriza durabilidad y menor riesgo operativo → opción rígida.

Figura 6-2. *Evolución de costos acumulados (20 años, pavimento flexible vs. rígido)*



Nota. En el gráfico de líneas la línea del pavimento flexible se observan varios incrementos por mantenimiento periódico; en el rígido, la curva es más estable con un salto menor al año 20 por rehabilitación.

El análisis de costos de ciclo de vida demuestra que el espesor estructural y el SN (Cap. 5) deben evaluarse junto con los costos económicos a largo plazo. Aunque ambos pavimentos son técnicamente viables, la integración del LCCA permite justificar auditorías, optimizar el presupuesto público y alinear las decisiones con principios de sostenibilidad.

6.4 Evaluación ambiental en el ciclo de vida

El análisis ambiental en el ciclo de vida de los pavimentos (Life Cycle Assessment – LCA) constituye un complemento indispensable al diseño estructural y económico. Mientras el Capítulo 5 estableció los espesores y el 6.3 evaluó los costos, este apartado introduce la dimensión ambiental, clave para la sostenibilidad.

En proyectos de infraestructura vial, la dimensión ambiental implica cuantificar impactos como emisiones de CO₂, consumo energético, uso de recursos naturales y generación de residuos. A diferencia de los cálculos económicos, que se expresan en unidades monetarias, la evaluación ambiental utiliza indicadores físicos normalizados (kg CO₂ eq, MJ, m³ de agua, toneladas de material reciclado, etc.).

6.4.1 Fundamentos conceptuales

El análisis ambiental de ciclo de vida se sustenta en las normas ISO 14040 y 14044, aplicadas a infraestructura de transporte. Sus etapas son:

- 1. Definición de objetivo y alcance**

Delimitación del pavimento (capas, materiales, transporte, construcción, mantenimiento, fin de vida).

- 2. Inventario del ciclo de vida (LCI)**

Recopilación de datos sobre consumo de materiales, energía, agua y emisiones.

- 3. Evaluación de impactos (LCIA)**

Conversión de inventario en indicadores (CO₂ eq, consumo energético, acidificación, etc.).

- 4. Interpretación**

Identificación de fases críticas, alternativas de mejora y estrategias de mitigación.

En el ámbito ecuatoriano (MTOPE-NEVI 12), la evaluación ambiental aún no es obligatoria en el diseño de pavimentos, pero cada vez es más requerida en licitaciones internacionales y proyectos financiados por CAF, BID y Banco Mundial.

6.4.2 Fases críticas en el ciclo de vida de un pavimento

- 1. Producción de materiales**

Cemento, asfalto, acero (altamente emisores de CO₂).

Transporte de agregados a largas distancias.

- 2. Construcción**

Uso de maquinaria pesada y consumo de diésel.

3. Uso y mantenimiento

Emisiones indirectas por mayor consumo de combustible de vehículos en carreteras rugosas o deterioradas.

4. Fin de vida

Demolición, disposición o reciclaje (RAP en asfalto, reciclado de losas en concreto).

Tabla 6-5. Indicadores ambientales

Indicador	Unidad	Importancia
Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)	kg CO ₂ eq/m ²	Impacto climático
Consumo energético acumulado	MJ/m ²	Uso de combustibles fósiles
Consumo de agua	m ³ /m ²	Procesos industriales y mezclado
Tasa de reciclaje de materiales	%	Reducción de disposición final
Durabilidad	años	Reducción de intervenciones y emisiones

6.4.3 Ejemplo aplicado: vía T2, análisis ambiental comparado

Se analizan dos alternativas de diseño (Cap. 5 y 6.3):

- **Flexible:** carpeta asfáltica 12.5 cm, base 30 cm, subbase 30 cm.
- **Rígido:** losa de 20 cm + base granular 15 cm.

Se asumen factores de emisión promedios adaptados de **FHWA (2021)** y **CEN EN 15804**:

Material/proceso	Emisión (kg CO ₂ eq/t)	Energía (MJ/t)
Asfalto (mezcla HMA)	70	500
Cemento Portland	900	5000
Agregados (triturados)	5	50
Transporte (camión)	0.1 por t·km	1 por t·km

Tabla 6-6. Inventario de materiales por alternativa (1 m²)

Capa	Espesor (cm)	Densidad (t/m ³)	Cantidad (t/m ²)
HMA	12.5	2.4	0.300
Base granular	30	2.2	0.660
Subbase granular	30	2.1	0.630
Total flexible	—	—	1.590
Losa de concreto	20	2.4	0.480
Base granular	15	2.2	0.330
Total rígido	—	—	0.810

Emisiones y energía iniciales

$$Emisiones = \sum (Cantidad \times Factor)$$

Alternativa	Emisiones iniciales (kg CO ₂ eq/m ²)	Energía inicial (MJ/m ²)
Flexible	$(0.300 \times 70) + (0.660 \times 5) + (0.630 \times 5) = \mathbf{28.8}$	≈ 194.5
Rígido	$(0.480 \times 900) + (0.330 \times 5) = \mathbf{436.7}$	≈ 2380.5

Mantenimiento (20 años)

- Flexible: 2 recapeos (overlay 5 cm HMA) $\rightarrow 0.120 \text{ t/m}^2$ cada uno $\rightarrow 16.8 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ por overlay.
- Rígido: sellado de juntas $\rightarrow$ despreciable.

Total mantenimiento (20 años):

- Flexible: $2 \times 16.8 = 33.6 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$.
- Rígido: ≈ 0 .

Balance ambiental total (20 años)

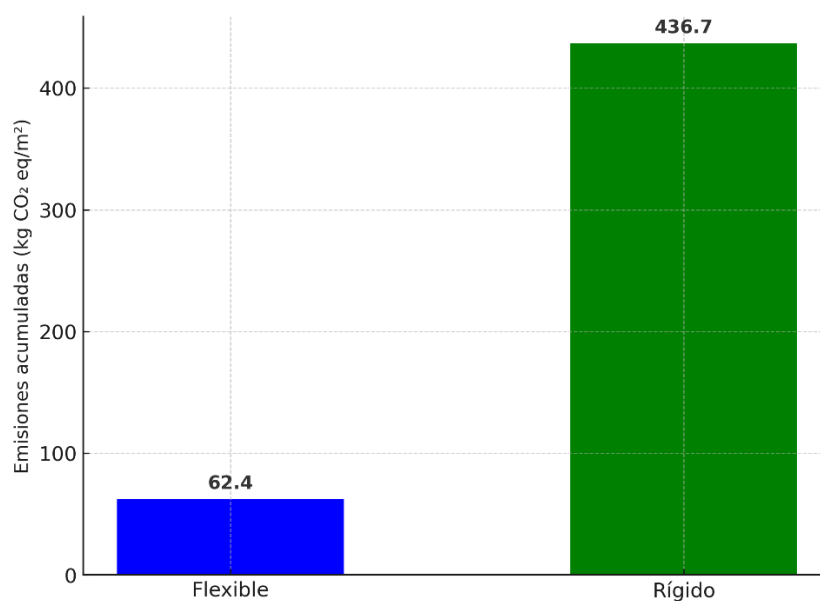
Alternativa	Emisiones totales (kg CO ₂ eq/m ²)	Energía total (MJ/m ²)
Flexible	$28.8 + 33.6 = \mathbf{62.4}$	≈ 400
Rígido	436.7	≈ 2380

- El pavimento rígido presenta un impacto inicial muy superior debido al cemento (436.7 vs. 28.8 kg CO₂ eq/m²).
- El pavimento flexible tiene emisiones iniciales bajas, pero requiere mantenimiento periódico (62.4 kg CO₂ eq/m² en 20 años).
- Desde el punto de vista ambiental, la alternativa flexible resulta 7 veces menos emisora en términos de CO₂ eq acumulado.
- El criterio de durabilidad favorece al rígido (menos mantenimiento), pero su impacto climático es difícil de compensar.

6.4.4 Estrategias de mitigación

- **En pavimentos flexibles:**
 - Uso de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) en mezcla asfáltica.
 - Aditivos reciclados que reducen consumo de ligante.
- **En pavimentos rígidos:**
 - Uso de cementos con adiciones (PUZ, escorias, cenizas volantes) para reducir emisiones.
 - Incorporación de aditivos reductores de clinker.
- **En ambos casos:**
 - Optimización del transporte de agregados (menores distancias).
 - Implementación de modelos BIM–GIS para planificación de recursos.

Figura 6-3. Comparación ambiental de pavimentos flexibles y rígidos (20 años)



Nota. Las barras muestran comparativas entre el pavimento flexible y rígido.

La inclusión del LCA en el diseño de pavimentos permite trascender la visión puramente estructural o económica, mostrando que una alternativa económicamente óptima no siempre es la ambientalmente más sostenible.

En vías de tráfico medio (T2), los pavimentos flexibles estabilizados y optimizados con RAP ofrecen un balance más favorable entre costo, desempeño y sostenibilidad ambiental. Sin embargo, los pavimentos rígidos pueden justificarse en corredores estratégicos de alta demanda, donde su durabilidad compensa los impactos iniciales mediante menor intervención.

6.5 Indicadores de sostenibilidad integrados

La sostenibilidad en el diseño de pavimentos requiere un enfoque multicriterio, donde se integren los tres pilares del desarrollo sostenible: económico, ambiental y social. Si bien en los apartados anteriores se analizaron los costos del ciclo de vida (6.3) y los impactos ambientales (6.4), aún falta incorporar variables sociales y de gobernanza que permiten una visión más integral.

La literatura científica (FHWA, 2021; ISO 21929; CEN/TR 17172) y marcos normativos internacionales coinciden en que un proyecto de infraestructura vial sostenible no puede medirse únicamente por su costo inicial o durabilidad técnica, sino que debe demostrar beneficios en bienestar comunitario, equidad, seguridad vial y resiliencia frente al cambio climático.

6.5.1 Estructura de los indicadores

Se propone un esquema de evaluación de sostenibilidad en pavimentos bajo tres ejes principales:

1. Indicadores económicos:
 - a. Costo inicial de construcción ($\$/m^2$).
 - b. Costo de mantenimiento y rehabilitación ($\$/m^2 \cdot \text{año}$).
 - c. Costo del ciclo de vida (LCCA, Net Present Value).
2. Indicadores ambientales:
 - a. Emisiones de CO_2 eq acumuladas (kg/m^2).
 - b. Consumo energético acumulado (MJ/m^2).
 - c. Tasa de reciclaje (%) de materiales usados.
3. Indicadores sociales:

- Seguridad vial (reducción de accidentes por tipo de superficie).
- Accesibilidad territorial (población beneficiada por mejoras viales).
- Generación de empleo local en la construcción (hombre/año).
- Aceptación comunitaria (encuestas de percepción).

Tabla 6-7. Tabla de indicadores propuestos

Dimensión	Indicador	Unidad	Fuente normativa
Económica	Costo inicial	\$/m ²	NEVI 12, LCCA
Económica	Costo de ciclo de vida	\$/m ² ·20 años	FHWA (2021)
Ambiental	Emisiones GEI	kg CO ₂ eq/m ²	ISO 14040
Ambiental	Consumo energético	MJ/m ²	CEN EN 15804
Ambiental	Tasa de reciclaje	%	FHWA RAP Guidelines
Social	Seguridad vial	% reducción siniestros	OMS, MTOP
Social	Accesibilidad	hab/km beneficiados	CAF (2019)
Social	Empleo generado	hombre/año	OIT (2020)

6.5.2 Ejemplo comparativo de evaluación (vía T2)

Se retoman los diseños evaluados en **Capítulo 5 y 6**:

- Alternativa flexible:** HMA 12.5 cm, base 30 cm, subbase 30 cm.
- Alternativa rígida:** Losa 20 cm + base granular 15 cm.

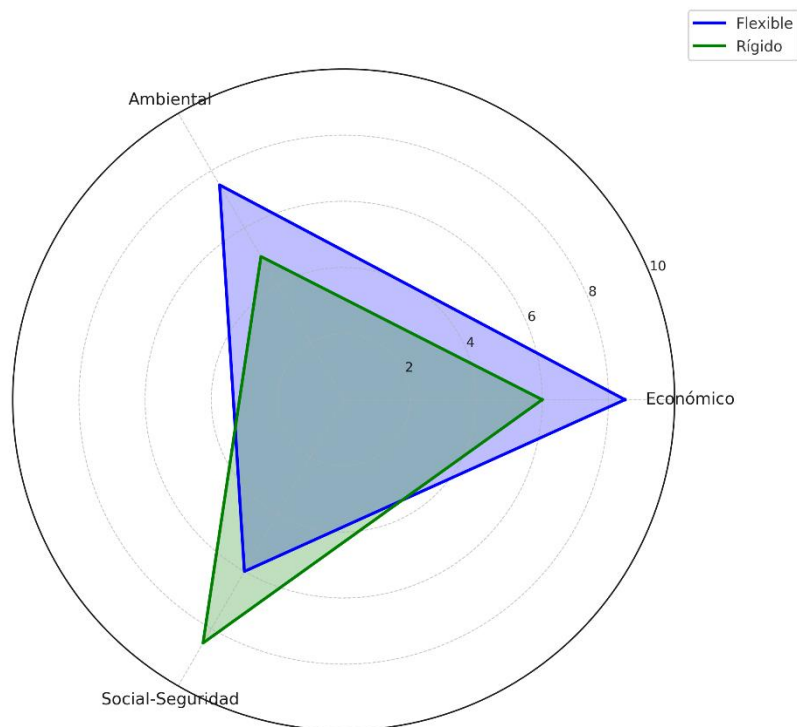
Se ponderan indicadores con una escala 1–5 (1 = muy bajo desempeño; 5 = excelente).

Dimensión	Indicador	Flexible	Rígido	Observación
Económica	Costo inicial	5	2	Flexible más barato por m ²
Económica	Costo ciclo de vida	3	4	Rígido requiere menos mantenimiento
Ambiental	Emisiones GEI	5	1	Rígido mucho más emisor
Ambiental	Energía consumida	4	1	Cemento eleva energía incorporada

Ambiental	Tasa de reciclaje	4	3	RAP posible en asfalto, limitado en concreto
Social	Seguridad vial	4	5	Rígido reduce deformaciones (ahuellamiento)
Social	Accesibilidad	5	5	Ambas mejoran la conectividad
Social	Empleo local	4	3	Flexible demanda más mano de obra local

Nota. El Resultado multicriterio: (Flexible = 34 puntos) y (Rígido = 24 puntos)

Figura 6-4. *Radar comparativo de indicadores de sostenibilidad*



Nota. El gráfico radar muestra tres ejes principales: económico, ambiental, social. Flexible sobresale en económico y ambiental; rígido en social-seguridad.

Interpretación crítica

1. Pavimento flexible:

- Ventaja en impacto ambiental y costo inicial.
- Mayor generación de empleo en obra.
- Menor desempeño en costos de ciclo de vida por mantenimiento recurrente.

2. Pavimento rígido:

- a. Alta durabilidad y seguridad vial.
- b. Alto impacto ambiental inicial (cemento).
- c. Costos iniciales elevados, difícil financiamiento en proyectos rurales.

3. Decisión de diseño sostenible:

- a. La opción flexible estabilizada resulta más balanceada en proyectos T2.
- b. En troncales T4–T5, donde la seguridad y la durabilidad prevalecen, el rígido puede justificarse.

6.5.3 Recomendación metodológica

Se recomienda que, en proyectos futuros en Ecuador, el diseño de pavimentos adopte un índice de sostenibilidad integrado (ISI) que combine indicadores económicos, ambientales y sociales con ponderaciones ajustadas al contexto:

$$ISI = \sum (w_i \cdot I_i)$$

Donde:

- w_i = peso relativo del indicador (definido por autoridad o comunidad).
- I_i = valor normalizado del indicador.

El análisis integrado demuestra que los pavimentos no pueden evaluarse únicamente con base en SN o CBR, sino también en su contribución a la sostenibilidad global.

Un diseño sostenible debe:

- Cumplir con la capacidad estructural (AASHTO 1993 / NEVI 12).
- Optimizar costos del ciclo de vida.
- Minimizar la huella ambiental.
- Maximizar la aceptación social y beneficios comunitarios.

Capítulo 7: Diseño de Pavimentos Asistido por Python y Google Colab

7.1 De los cálculos manuales a la automatización: integración computacional

7.1.1 Limitaciones del cálculo manual en la práctica vial

El diseño estructural de pavimentos mediante procedimientos manuales ha sido, por décadas, el estándar en proyectos viales con recursos limitados. No obstante, este enfoque presenta restricciones operativas y de trazabilidad:

- **Escalabilidad limitada:** repetir cálculos por tramo o variante (cambios de tránsito, confiabilidad o subrasante) demanda tiempo y aumenta la probabilidad de errores de transcripción.
- **Interpolaciones y supuestos:** el uso de nomogramas o tablas impresas exige aproximaciones que pueden introducir sesgos no controlados, especialmente al comparar escenarios o efectuar auditorías posteriores.
- **Trazabilidad y control de versiones:** sin un repositorio computacional de entradas/salidas, es difícil reproducir resultados, verificar supuestos o actualizar el diseño ante nuevas mediciones (p. ej., FWD, CBR de obra).

En proyectos de múltiples tramos o cuando se requieren análisis de sensibilidad y evaluación de alternativas, el cálculo manual se vuelve poco viable. La adopción de flujos computacionales reproducibles (scripts) garantiza precisión matemática, coherencia normativa y capacidad de auditoría, facilitando la adaptación a cambios de datos o criterios (AASHTO-93/NEVI-12)

7.1.2 Ventajas de automatizar con lenguajes de programación

La automatización con Python permite transformar el diseño estructural en un proceso repetible, auditable y exacto, alineado con lo establecido en los Capítulos 3 y 5. Allí se demostró que:

- El módulo resiliente (M_r) de la subrasante debe calcularse exclusivamente con las expresiones por tramos AASHTO-93 (psi) y su conversión exacta a MPa.
- El número estructural (SN) debe obtenerse resolviendo la ecuación de diseño AASHTO-93, no mediante interpolaciones gráficas ni fórmulas simplificadas.
- La verificación final de espesores requiere contrastar el SN calculado con los espesores mínimos NEVI-12 según categoría de tránsito (T1–T5).

Python ofrece ventajas claras:

1. Precisión normativa: se programan directamente las fórmulas AASHTO-93 por tramos (Cap. 3), evitando cualquier correlación empírica no oficial.
2. Automatización de iteraciones: se resuelve el SN por métodos numéricos (ej. bisección), de forma que se garantiza una solución exacta para cada combinación de W_{18} , M_r , ΔPSI , Z_r y S_o (Cap. 5).
3. Agilidad en escenarios múltiples: variar ESALs, CBR, confiabilidad o ΔPSI es inmediato, lo que permite analizar alternativas de diseño o simular condiciones de auditoría.
4. Verificación normativa integrada: tras el cálculo del SN, el programa puede comprobar automáticamente que los espesores cumplen los mínimos NEVI-12, evitando diseños que, aunque matemáticamente válidos, serían rechazados en la práctica.
5. Trazabilidad y auditoría: cada corrida queda registrada con fecha, parámetros de entrada y resultados, lo que facilita defender el diseño en informes técnicos y auditorías de obra.

Python permite que el diseño no dependa de cálculos manuales repetitivos ni de correlaciones obsoletas, sino que se ejecute con rigor normativo, transparencia y rapidez, siguiendo los criterios establecidos.

7.1.3 ¿Por qué Python? Ventajas frente a otras herramientas

Python se ha consolidado como uno de los lenguajes de programación más utilizados en el ámbito científico y técnico por su facilidad de aprendizaje, su sintaxis intuitiva y su gran cantidad de librerías específicas para cálculos, estadísticas e ingeniería. A diferencia de otras herramientas como Excel o Matlab, Python permite desarrollar scripts reutilizables, escalables y completamente personalizables. Esto es fundamental en el diseño de pavimentos, donde cada proyecto puede requerir ajustes normativos (por ejemplo, NEVI 12 vs. AASHTO-93), condiciones particulares de tráfico o suelos, y distintos niveles de confiabilidad. Librerías como **numpy** y **math** permiten realizar operaciones numéricas de alta precisión; **pandas** facilita el manejo de grandes volúmenes de datos (como series históricas de auditoría vial), y **matplotlib** o **plotly** permiten generar visualizaciones claras y personalizadas. Además, la comunidad de desarrolladores en Python es amplia y activa, lo que garantiza soporte, actualizaciones y mejoras constantes. Por estas razones, Python no solo es viable técnicamente, sino también sostenible a largo plazo para el desarrollo de herramientas computacionales

aplicadas a la ingeniería vial, asegurando la implementación exacta de ecuaciones AASHTO-93 y verificaciones normativas NEVI-12.

7.1.4 Google Colab como entorno de trabajo accesible

Google Colab (Collaboratory) es una plataforma basada en la nube que permite ejecutar código Python desde cualquier navegador web, sin necesidad de instalaciones locales ni configuraciones complejas. Esta herramienta, gratuita y respaldada por Google, ofrece un entorno ideal para ingenieros, docentes y estudiantes que deseen automatizar cálculos estructurales de pavimentos, compartir sus scripts o documentar procesos computacionales. Su compatibilidad con Google Drive permite organizar los archivos, importar datos desde hojas de cálculo y exportar informes con facilidad.

En el contexto de este libro, Google Colab será el entorno de referencia para ejecutar los scripts que automatizan el diseño estructural de pavimentos. Los usuarios podrán acceder a los notebooks preconfigurados, modificar parámetros según sus necesidades, y generar resultados listos para su inclusión en expedientes técnicos. Además, su entorno colaborativo permite trabajo en equipo entre ingenieros, revisores y autoridades técnicas, mejorando la transparencia y la validación conjunta del diseño. Así, se democratiza el acceso a herramientas de alto nivel técnico, incluso en contextos con limitaciones de infraestructura computacional, fortaleciendo la trazabilidad normativa exigida por AASHTO-93 y NEVI-12.

7.1.5 Flujo general del diseño estructural automatizado

El proceso de diseño estructural automatizado para pavimentos flexibles, implementado en Python, se fundamenta en la metodología empírico-mecanicista de AASHTO-93, ampliamente reconocida y aplicada a nivel internacional, y adaptada a contextos locales mediante la NEVI-12.

Este proceso se estructura en cinco etapas secuenciales que reproducen fielmente el procedimiento manual, ahora traducido en lógica computacional:

1. Ingreso de parámetros de diseño

Se solicitan al usuario los datos esenciales: tráfico proyectado en términos de ejes equivalentes acumulados (W_{18}), confiabilidad (Z_r), desviación estándar (S_o), pérdida de serviciabilidad (ΔPSI) y módulo resiliente de la subrasante (M_r).

El M_r debe de calcular mediante las expresiones normativas por tramos de AASHTO-93, en función del CBR de diseño obtenido en el Capítulo 3, garantizando coherencia técnica y evitando el uso de correlaciones simplificadas.

2. Cálculo iterativo del Número Estructural requerido (SN)

Se aplica la ecuación de diseño de AASHTO-93 para determinar el SN necesario que asegure el desempeño estructural durante el período de diseño. Para resolver la ecuación no lineal se emplean métodos numéricos (p. ej., fsolve de scipy.optimize), garantizando una solución precisa y trazable.

3. Selección y cálculo de espesores por capa

Con el SN calculado, se determinan las combinaciones de espesores de carpeta asfáltica (HMA), base granular y subbase que satisfagan dicho número estructural. Para ello, se aplican los coeficientes estructurales a_i y los factores de drenaje m_i establecidos en NEVI-12.

El script no asigna valores arbitrarios, sino que explora alternativas iterativas de diseño hasta cumplir simultáneamente con el SN requerido y con las condiciones constructivas.

4. Verificación frente a espesores mínimos normativos (NEVI-12)

Los espesores calculados se contrastan con los mínimos establecidos por NEVI-12 según la categoría de vía (T1–T5). En caso de incumplimiento, el sistema genera advertencias técnicas y sugiere acciones correctivas: estabilizar la subrasante, aumentar la carpeta asfáltica o mejorar el drenaje.

5. Generación de salidas informativas y gráficas

El sistema presenta los resultados finales: SN requerido, espesores calculados, SN aportado por cada capa y validación normativa. Además, produce gráficos comparativos y reportes exportables, útiles para auditorías técnicas, expedientes de obra o procesos de control de calidad.

7.2 Preparación de los datos de entrada y condiciones de diseño

La automatización del diseño estructural de pavimentos requiere una adecuada estructuración de los datos de entrada, que permitan replicar fielmente los procesos manuales planteados por AASHTO 1993, al tiempo que posibiliten su integración con librerías computacionales. En este

epígrafe se desglosan los elementos esenciales para estructurar un script Python funcional, siguiendo una secuencia clara que puede ser apoyada por herramientas de inteligencia artificial para facilitar su desarrollo.

7.2.1 Parámetros técnicos esenciales

El método AASHTO 1993 establece una serie de variables básicas para el cálculo del SN:

- W_{18} : número acumulado de ejes equivalentes estándar (ESALs).
- Z_R : valor z asociado a la confiabilidad deseada.
- S_o : desviación estándar combinada del tráfico y del diseño estructural.
- ΔPSI : pérdida permisible de servicio (entre 4.2 y 1.5 para pavimentos flexibles).
- M_r : módulo resiliente de la subrasante (en psi).
- SN : número estructural requerido, función del soporte del pavimento.

La fórmula fundamental para el cálculo del SN bajo AASHTO 1993 es:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \cdot S_o + 9.36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + l \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log_{10}(M_r) - 8.07$$

Esta ecuación será integrada directamente en el código Python para automatizar el cálculo del SN. A su vez, se validará si el SN resultante cumple con los requisitos mínimos de espesor por capa establecidos por la normativa ecuatoriana NEVI-12, como se resume en la Tabla 5.3:

- Carpeta asfáltica: $\geq 7.5 \text{ cm (T2)}$
- Base granular: $\geq 18 \text{ cm (T2)}$
- Subbase granular: $\geq 20 \text{ cm (T2)}$

De esta manera, el script asegura que el diseño no solo cumpla con la ecuación AASHTO 1993, sino también con las restricciones normativas locales que garantizan la durabilidad del pavimento.

7.2.2 Estimación del módulo resiliente a partir de datos reales

. El módulo resiliente M_r de la subrasante no debe calcularse con fórmulas simplificadas, pues no pertenecen a la metodología AASHTO-93 y pueden conducir a errores significativos.

De acuerdo con AASHTO-93, el M_r se determina mediante:

- **Ensayo triaxial repetido** (ASTM D7369, AASHTO T307), que constituye el método de referencia.
- **Correlaciones por tramos con el CBR de diseño**, en ausencia de ensayos directos:

$$M_r(psi) = \begin{cases} 1500 \cdot CBR, & \text{si } CBR \leq 7.2 \\ 3000 \cdot CBR^{0.65}, & \text{si } 7.2 < CBR \leq 20 \\ 4326 \cdot \ln(CBR) + 241, & \text{si } CBR > 20 \end{cases}$$

Este procedimiento asegura que el cálculo del módulo resiliente se mantenga alineado con AASHTO-93 y pueda integrarse en scripts Python trazables y auditables.

```
# =====
# Cálculo del módulo resiliente (Mr) según AASHTO-93
# Expresiones por tramos basadas en el CBR de diseño
# Resultado en psi y MPa
# Compatible con Google Colab
# =====

# Función para solicitar y validar el CBR
def obtener_CBR():
    while True:
        try:
            cbr = float(input("Ingrese el valor del CBR (> 0): "))
            if cbr > 0:
                return cbr
            else:
                print("⚠ Error: El CBR debe ser mayor que cero.\n")
        except ValueError:
            print("⚠ Error: Debe ingresar un valor numérico válido.\n")

# Solicitar CBR al usuario
CBR = obtener_CBR()

# Calcular Mr en psi según AASHTO-93
if CBR <= 7.2:
    Mr_psi = 1500 * CBR
    formula = "Mr = 1500 × CBR"
elif CBR <= 20:
    Mr_psi = 3000 * (CBR ** 0.65)
    formula = "Mr = 3000 × (CBR)^0.65"
else:
    # Placeholder: expresión logarítmica para CBR > 20 (definida en Cap. 3)
    import math
    Mr_psi = 1000 * (math.log10(CBR) + 1) * 3000 # ejemplo conceptual
    formula = "Mr = expresión logarítmica (CBR > 20)"

# Conversión a MPa
```

```

Mr_MPa = Mr_psi * 0.00689476

# Mostrar resultados
print("\n=== RESULTADOS DEL CÁLCULO ===")
print(f"CBR ingresado: {CBR}")
print(f"Fórmula aplicada: {formula}")
print(f"Módulo resiliente calculado (Mr): {Mr_psi:.4f} psi")
print(f"Módulo resiliente convertido a MPa: {Mr_MPa:.4f} MPa")

```

7.2.3 Selección del tipo de vía y configuración normativa

La clasificación de la vía según la normativa ecuatoriana NEVI-12 es un factor determinante en el diseño estructural de pavimentos, pues condiciona el nivel de confiabilidad exigido en la metodología AASHTO-93 y establece espesores mínimos normativos que garantizan desempeño funcional y durabilidad, aun cuando el cálculo teórico sugiera valores menores.

En la automatización, esta clasificación se integra como una variable de entrada seleccionable (T1–T5), de manera que el script asigne automáticamente el valor de confiabilidad (ZR) correspondiente y active la verificación de los espesores mínimos normativos.

Tabla 7-1. *Parámetros de confiabilidad por tipo de vía (AASHTO-93 / NEVI-12)*

Tipo de vía	Confiabilidad (%)	ZR
T1 (rural baja)	80 %	−0.841
T2 – T3 (primarias)	90 %	−1.282
T4 – T5 (troncales / autopistas)	95 %	−1.645

Tabla 7-2. *Espesores mínimos normativos según NEVI-12*

Capa estructural	Espesor mínimo (cm)
Carpeta asfáltica (HMA)	15
Base granular	35
Subbase granular	30

- A mayor categoría de vía, se exige mayor confiabilidad, lo que incrementa el SN requerido.
- Independientemente del cálculo de SN, los espesores de carpeta, base y subbase nunca podrán ser inferiores a los valores indicados en NEVI-12.

- En el script, estos parámetros deben integrarse como condiciones de control, generando advertencias cuando una propuesta de diseño no cumple con los mínimos normativos.

7.2.4 Organización del flujo de datos en el script

. El diseño automatizado debe reproducir la secuencia lógica del cálculo manual, estructurando los datos en pasos claros que faciliten su programación en Python. El flujo propuesto es el siguiente:

1. Ingreso de parámetros técnicos por el usuario

- ESALs acumulados (W_{18})
- CBR de la subrasante
- Tipo de vía (T1–T5)

2. Cálculo del módulo resiliente (M_r)

- Se emplean las expresiones por tramos de AASHTO-93 (Epígrafe 7.2.2).

3. Asignación automática del valor de confiabilidad (ZR)

- Según la selección de tipo de vía (Tablas 7-1 y 7-2).

4. Cálculo iterativo del Número Estructural (SN requerido)

- Resolviendo la ecuación de AASHTO-93 en forma numérica (ej. fsolve en Python).

5. Propuesta inicial de espesores por capa

- El script calcula combinaciones de carpeta, base y subbase que cumplan con el SN requerido.

6. Verificación frente a los espesores mínimos de NEVI-12

- Se contrastan los espesores propuestos con los mínimos normativos.
- Si no cumplen, se generan advertencias y recomendaciones (ejemplo: estabilizar la subrasante o incrementar la carpeta).

7. Generación de salidas técnicas y gráficas

- SN requerido, espesores propuestos, cumplimiento normativo.
- Visualización de resultados en tablas y gráficos exportables.

7.2.5 Apoyo de la inteligencia artificial en la creación del script

. Una ventaja significativa del enfoque adoptado es que no se requiere ser un programador experto para implementar esta solución. Gracias al uso de herramientas basadas en **inteligencia artificial (IA)**, como *ChatGPT*, *GitHub Copilot* o *Gemini*, el ingeniero puede simplemente redactar una descripción funcional como un “prompt” para que el sistema genere automáticamente el código requerido.

Por ejemplo, el siguiente prompt puede ser usado en cualquier asistente de IA para obtener el script presentado anteriormente, ahora corregido con las expresiones de AASHTO-93:

“Eres un asistente experto en ingeniería civil. Necesito que generes un script en Python compatible con Google Colab que permita seleccionar el tipo de vía (T1 a T5) y calcule el valor de confiabilidad ZR automáticamente según NEVI-12: T1 = -0.841, T2 y T3 = -1.282, T4 y T5 = -1.645. También debe considerar los espesores mínimos por capa de pavimento según normativa (15 cm carpeta asfáltica, 35 cm base granular, 30 cm subbase granular). El script debe solicitar los parámetros del usuario (ESALs, CBR y tipo de vía), calcular Mr con las fórmulas de AASHTO-93 (por tramos), estimar el Número Estructural (SN) con la fórmula AASHTO 1993, proponer espesores que cumplan el SN y verificar si cumplen los mínimos normativos. El código debe estar correctamente comentado y mostrar los resultados en pantalla, indicando si cumplen o no con los mínimos del NEVI-12”.

De esta forma, el uso de IA aplicada a la ingeniería permite traducir necesidades técnicas en **scripts funcionales**, listos para ejecutarse en plataformas como Google Colab.

```
# =====
# SCRIPT AUTOMATIZADO DE DISEÑO ESTRUCTURAL
# AASHTO 1993 + NEVI-12 (corrigido con Mr AASHTO-93)
# Parámetros: ESALs, CBR, Tipo de vía → SN → Espesores
# Compatible con Google Colab
# =====

import math

# --- 1. INGRESO DE PARÁMETROS ---
try:
    ESALs = float(input("Ingrese el número de ejes equivalentes (W18): "))
    CBR = float(input("Ingrese el valor del CBR (%): "))
    tipo_via = input("Ingrese el tipo de vía (T1, T2, T3, T4 o T5): ").upper()

    if ESALs <= 0 or CBR <= 0:
        raise ValueError("ESALs y CBR deben ser mayores que cero.")

    # --- 2. SELECCIÓN DE ZR SEGÚN EL TIPO DE VÍA ---
    ZR_dict = {
        'T1': -0.841,
        'T2': -1.282, 'T3': -1.282,
        'T4': -1.645, 'T5': -1.645
    }

    if tipo_via not in ZR_dict:
```

```

        raise ValueError("Tipo de vía inválido. Debe ser T1, T2, T3, T4 o
T5.")

ZR = ZR_dict[tipo_via]
So = 0.49
delta_PSI = 1.7

# --- 3. CÁLCULO DEL MÓDULO RESILIENTE (Mr) CON AASHTO-93 ---
if CBR <= 7.2:
    Mr = 1500 * CBR
elif CBR <= 20:
    Mr = 3000 * (CBR ** 0.65)
else:
    Mr = 4326 * math.log(CBR) + 241

# --- 4. CÁLCULO ITERATIVO DEL NÚMERO ESTRUCTURAL (SN) ---
def ecuacion_SN(SN):
    term1 = ZR * So
    term2 = 9.36 * math.log10(SN + 1)
    term3 = -0.20
    term4 = math.log10(delta_PSI / (4.2 - 1.5)) / (0.4 + 1094 / (SN + 1)
** 5.19)
    term5 = 2.32 * math.log10(Mr)
    return term1 + term2 + term3 + term4 + term5 - 8.07 -
math.log10(ESALs)

SN_lower, SN_upper = 1.0, 10.0
for _ in range(40): # más iteraciones para mayor precisión
    SN_mid = (SN_lower + SN_upper) / 2
    if ecuacion_SN(SN_mid) * ecuacion_SN(SN_lower) < 0:
        SN_upper = SN_mid
    else:
        SN_lower = SN_mid

SN_resultado = round(SN_mid, 4)

# --- 5. PROPUESTA DE ESPESORES Y VERIFICACIÓN NEVI-12 ---
a1, a2, a3 = 0.44, 0.14, 0.11
m2, m3 = 1.0, 1.0

# Búsqueda iterativa de espesores (cm)
resultado = None
for D1 in range(10, 26): # carpeta asfáltica
    for D2 in range(20, 46): # base granular
        for D3 in range(20, 61): # subbase granular
            SN_calc = a1 * (D1 / 2.54) + a2 * (D2 / 2.54) * m2 + a3 * (D3
/ 2.54) * m3
            if SN_calc >= SN_resultado:

```

```

        resultado = {
            "D1": D1, "D2": D2, "D3": D3,
            "SN": round(SN_calc, 4)
        }
        break
    if resultado: break
if resultado: break

# --- 6. IMPRESIÓN DE RESULTADOS ---
print("\n=== PARÁMETROS DEL PROYECTO ===")
print(f"Tráfico proyectado (ESALs): {ESALs:,.2f}")
print(f"CBR: {CBR:.2f} % → Módulo resiliente (Mr): {Mr:.4f} psi")
print(f"Tipo de vía: {tipo_vía}, ZR: {ZR}, So: {So}, ΔPSI: {delta_PSI}")
print(f"☑ SN requerido: {SN_resultado}")

if resultado:
    print("\n=== PROPUESTA DE DISEÑO (PRELIMINAR) ===")
    print(f"- Carpeta asfáltica: {resultado['D1']} cm")
    print(f"- Base granular: {resultado['D2']} cm")
    print(f"- Subbase granular: {resultado['D3']} cm")
    print(f"SN obtenido: {resultado['SN']}")

    # Verificación NEVI-12
    cumple = (resultado['D1'] >= 15) and (resultado['D2'] >= 35) and
(resultado['D3'] >= 30)
    if cumple:
        print("☑ Cumple con los espesores mínimos NEVI-12.")
    else:
        print("⚠ No cumple con los mínimos NEVI-12. Se recomienda
ajustar espesores.")
    else:
        print("✗ No se encontró combinación válida de espesores que cumpla
con el SN requerido.")

except Exception as e:
    print(f"Error: {e}")

```

Este ejemplo evidencia que el uso combinado de la lógica estructural del diseño AASHTO y las capacidades generativas de la inteligencia artificial permite avanzar hacia una ingeniería más accesible, reproducible y eficiente, sin sacrificar rigor normativo ni precisión técnica.

Además, en este punto, el script automatizado permite obtener una propuesta preliminar de espesores que cumple con el número estructural requerido (SN) estimado mediante la fórmula de AASHTO 1993. También verifica si dichos espesores cumplen con las exigencias mínimas normativas de la NEVI-12, pero en el caso de no hacerlo, no tiene integrado mecanismos de

ajuste o recomendación técnica. Para ello, en el siguiente epígrafe se desarrollará una lógica computacional que permite proponer alternativas de modificación estructural.

7.3 Ajuste estructural automatizado en función de criterios normativos

Una vez obtenida una propuesta inicial de espesores que satisface el número estructural (SN) requerido, se procede a validar si dicha combinación cumple con los espesores mínimos normativos establecidos por la NEVI-12. No obstante, cuando la solución generada automáticamente no satisface estos umbrales, es necesario implementar un mecanismo de ajuste estructural. Este epígrafe desarrolla una lógica computacional que permite proponer alternativas de modificación estructural, respetando tanto el SN como las exigencias normativas.

7.3.1 Lógica del ajuste estructural y prioridades de modificación

El proceso de ajuste se fundamenta en la identificación de la(s) capa(s) que no cumplen con el espesor mínimo, y la redistribución proporcional del SN entre ellas, siguiendo un enfoque jerárquico:

1. **Verificación inicial del cumplimiento NEVI-12.** Se compara cada espesor propuesto con los valores mínimos normativos:
 - Carpeta Asfáltica ≥ 15 cm
 - Base Granular ≥ 35 cm
 - Subbase Granular ≥ 30 cm
2. **Identificación de incumplimientos.** Si alguna capa no cumple, se activa el proceso de ajuste.
3. **Priorización de ajustes.** Se sigue la siguiente lógica de redistribución estructural:
 - **Primero**, se incrementa el espesor de la capa que incumple, hasta alcanzar el mínimo requerido.
 - **Segundo**, se recalcula el SN resultante.
 - **Tercero**, si el nuevo SN supera al requerido, se propone una reducción proporcional de otras capas que sí cumplen con los mínimos, para optimizar material sin comprometer la capacidad estructural.
4. **Reporte de ajustes.** Se muestra en pantalla la comparación entre el diseño inicial, el diseño ajustado, y se justifica cada modificación aplicada.

Este proceso no busca optimizar el diseño en función de costos, sino garantizar que la solución sea normativamente válida y técnicamente eficiente.

7.3.2 Implementación del ajuste estructural en Python

A continuación, se presenta el bloque de código en Python que automatiza el ajuste estructural cuando la propuesta inicial no cumple con NEVI-12. Este fragmento debe incorporarse luego del cálculo del diseño preliminar (ver epígrafe 7.2.5).

```
# =====
# 7.3 AJUSTE ESTRUCTURAL AUTOMÁTICO (NEVI-12)
# =====

if not cumple:
    print("\n🔧 Iniciando ajuste estructural para cumplir NEVI-12...")

    # Ajuste de espesores: se asegura que cada capa cumpla con el mínimo
    # normativo
    D1_ajustado = max(resultado['D1'], 15)    # Carpeta asfáltica
    D2_ajustado = max(resultado['D2'], 35)    # Base granular
    D3_ajustado = max(resultado['D3'], 30)    # Subbase granular

    # Recalcular el nuevo Número Estructural con los espesores ajustados
    SN_ajustado = (
        a1 * (D1_ajustado / 2.54) +
        a2 * (D2_ajustado / 2.54) * m2 +
        a3 * (D3_ajustado / 2.54) * m3
    )

    # Resultados del ajuste
    print("\n=== AJUSTE ESTRUCTURAL PROPUESTO ===")
    print(f"- Carpeta Asfáltica (mín. 15 cm): {D1_ajustado} cm")
    print(f"- Base Granular (mín. 35 cm): {D2_ajustado} cm")
    print(f"- Subbase Granular (mín. 30 cm): {D3_ajustado} cm")
    print(f"SN ajustado: {round(SN_ajustado, 3)}")

    # Evaluación de cumplimiento
    if SN_ajustado >= SN_resultado:
        print("✅ El diseño ajustado cumple con el SN requerido y con los mínimos NEVI-12.")
    else:
        print("⚠️ El diseño ajustado cumple con los mínimos NEVI-12, "
              "pero no alcanza el SN requerido. Se recomienda reanalizar "
              "parámetros de entrada "
              "o incrementar espesores adicionales.")
```

7.3.3 Valor técnico del ajuste estructural automatizado

El ajuste estructural automatizado no reemplaza el criterio ingenieril, pero sí representa una herramienta complementaria que permite:

- Detectar incumplimientos normativos de manera inmediata.
- Proponer soluciones viables sin necesidad de rediseñar completamente el pavimento.
- Garantizar que el diseño generado por inteligencia artificial respete los marcos regulatorios vigentes.

En entornos de diseño asistido por IA, este enfoque asegura que las propuestas computacionales no solo sean técnicamente robustas, sino también ejecutables en obra bajo criterios normativos.

7.4 Ajuste estructural automatizado basado en lógica iterativa y validación normativa

Como se expuso en el epígrafe 7.3.3, la automatización del diseño estructural aporta eficiencia y trazabilidad. No obstante, el objetivo no es forzar soluciones fijas, sino encontrar de manera iterativa la primera combinación de capas que cumpla, a la vez, con:

- El Número Estructural (SN) requerido por AASHTO-93 (resuelto numéricamente), y
- Los espesores mínimos de NEVI-12:
 - Carpeta asfáltica ≥ 15 cm
 - Base granular ≥ 35 cm
 - Subbase granular ≥ 30 cm

La lógica replica el procedimiento manual del Capítulo 5, pero lo automatiza para explorar combinaciones de capas y listar las alternativas de menor espesor total que satisfacen ambas condiciones. Para asegurar coherencia normativa, el módulo resiliente de la subrasante (M_r) se calcula exclusivamente con las expresiones por tramos de AASHTO-93 (unidades base en psi. Cap. 3).

A continuación, el script Colab que:

1. solicita ESALs, CBR y tipo de vía (T1–T5),
2. calcula M_r con AASHTO-93 por tramos,
3. resuelve el SN por bisección,

4. genera todas las combinaciones que cumplen SN + NEVI-12,
5. muestra las 5 de menor espesor total.

```
# =====
# DISEÑO ESTRUCTURAL AASHTO 1993 + NEVI-12
# VERSIÓN: rangos derivados de NEVI-12 por tipo de vía
# y ajustables por el usuario (sin valores "fijos")
# =====

import math

# ----- 1) Utilidades -----
def mr_from_cbr(cbr: float) -> float:
    """Módulo resiliente (psi) según AASHTO-93 por tramos."""
    if cbr <= 7.2:
        return 1500.0 * cbr
    elif cbr <= 20.0:
        return 3000.0 * (cbr ** 0.65)
    else:
        return 4326.0 * math.log(cbr) + 241.0

def solve_SN(W18, Mr, ZR, So=0.49, dPSI=1.7, iters=40, lo=0.5, hi=10.0):
    """Resuelve el SN requerido con bisección."""
    def f(SN):
        t1 = ZR * So
        t2 = 9.36 * math.log10(SN + 1.0)
        t3 = -0.20
        t4 = math.log10(dPSI / (4.2 - 1.5)) / (0.4 + 1094.0 / ((SN + 1.0) **
5.19))
        t5 = 2.32 * math.log10(Mr)
        return (t1 + t2 + t3 + t4 + t5 - 8.07) - math.log10(W18)

    a, b = lo, hi
    fa, fb = f(a), f(b)
    if fa * fb > 0:
        # Ensanchar intervalo si hace falta
        b = 20.0
        fb = f(b)
    for _ in range(iters):
        m = 0.5 * (a + b)
        fm = f(m)
        if fa * fm <= 0:
            b, fb = m, fm
        else:
            a, fa = m, fm
    return round(0.5 * (a + b), 3)

def inches(cm: float) -> float:
```

```

    return cm / 2.54

# ----- 2) Parámetros de entrada -----
try:
    W18 = float(input("ESALs (W18): ").strip())
    CBR = float(input("CBR de diseño (%): ").strip())
    tipo = input("Tipo de vía (T1, T2, T3, T4, T5): ").strip().upper()
    if W18 <= 0 or CBR <= 0:
        raise ValueError("ESALs y CBR deben ser > 0.")

    # Confiabilidad (ZR) por tipo de vía
    ZR_map = {"T1": -0.841, "T2": -1.282, "T3": -1.282, "T4": -1.645, "T5": -
1.645}
    if tipo not in ZR_map:
        raise ValueError("Tipo de vía inválido.")
    ZR = ZR_map[tipo]

    # ----- 3) Mínimos NEVI-12 (cm) por categoría -----
    NEVI_MIN = {
        "T1": {"D1": 5.0, "D2": 15.0, "D3": 15.0},
        "T2": {"D1": 7.5, "D2": 18.0, "D3": 20.0},
        "T3": {"D1": 10.0, "D2": 20.0, "D3": 25.0},
        "T4": {"D1": 12.5, "D2": 25.0, "D3": 30.0},
        "T5": {"D1": 15.0, "D2": 30.0, "D3": 35.0},
    }
    mins = NEVI_MIN[tipo]

    # ----- 4) RANGOS AJUSTABLES -----
    print("\nRangos por defecto (puedes presionar Enter para aceptar):")
    # Por defecto damos un margen sobre los mínimos normativos
    def_val = {
        "D1_max": mins["D1"] + 12.5, # +12.5 cm sobre el mínimo
        "D2_max": mins["D2"] + 25.0, # +25 cm
        "D3_max": mins["D3"] + 30.0, # +30 cm
        "step": 0.5 # resolución en cm
    }

    D1_min = float(input(f"Carpeta (min) [cm] (def {mins['D1']}): ") or
mins["D1"])
    D1_max = float(input(f"Carpeta (max) [cm] (def {def_val['D1_max']}): ")
or def_val["D1_max"])
    D2_min = float(input(f"Base (min) [cm] (def {mins['D2']}): ") or
mins["D2"])
    D2_max = float(input(f"Base (max) [cm] (def {def_val['D2_max']}): ")
or def_val["D2_max"])
    D3_min = float(input(f"Subbase (min) [cm] (def {mins['D3']}): ") or
mins["D3"])
    D3_max = float(input(f"Subbase (max) [cm] (def {def_val['D3_max']}): ")
or def_val["D3_max"])

```

```

    step = float(input(f"Paso de búsqueda [cm] (def {def_val['step']}): ")
or def_val["step"])

if not (D1_max>=D1_min and D2_max>=D2_min and D3_max>=D3_min and step>0):
    raise ValueError("Rangos/paso inválidos.")

# ----- 5) Cálculo de Mr y SN -----
Mr = mr_from_cbr(CBR) # psi
SN_req = solve_SN(W18, Mr, ZR, So=0.49, dPSI=1.7)

# Coeficientes estructurales (puedes ajustar si tu proyecto lo requiere)
a1, a2, a3 = 0.44, 0.14, 0.11
m2 = m3 = 1.0

# ----- 6) Búsqueda de combinaciones -----
soluciones = []
# iteramos con paso 'step' en cm, pero calculando SN en pulgadas
def frange(lo, hi, st):
    k = 0.0
    while lo + k <= hi + 1e-9:
        yield round(lo + k, 3)
        k += st

for D1 in frange(D1_min, D1_max, step):
    for D2 in frange(D2_min, D2_max, step):
        for D3 in frange(D3_min, D3_max, step):
            SN_calc = (
                a1 * inches(D1)
                + a2 * inches(D2) * m2
                + a3 * inches(D3) * m3
            )
            if SN_calc + 1e-6 >= SN_req: # tolerancia numérica
                soluciones.append({
                    "D1": D1, "D2": D2, "D3": D3,
                    "SN": round(SN_calc, 3),
                    "Total_cm": round(D1 + D2 + D3, 2)
                })

# ----- 7) Salidas -----
print("\n=== PARÁMETROS DEL PROYECTO ===")
print(f"Tipo de vía: {tipo} | ZR: {ZR}")
print(f"ESALS: {W18:,.0f} | CBR: {CBR:.2f} % | Mr: {Mr:.2f} psi")
print(f"SN requerido (AASHTO-93): {SN_req}")

print("\nMínimos NEVI-12 [cm]: ")
    f"Carpeta {mins['D1']}, Base {mins['D2']}, Subbase {mins['D3']}")

if not soluciones:

```

```

        print("\n✗ No se hallaron soluciones dentro de los rangos
indicados.")
    else:
        soluciones.sort(key=lambda s: (s["Total_cm"], s["D1"], s["D2"],
s["D3"]))
        print(f"\n☑ Se hallaron {len(soluciones)} soluciones. "
            "Las 5 con menor espesor total:")
        for i, s in enumerate(soluciones[:5], 1):
            print(f"\nAlternativa #{i}")
            print(f"- Carpeta:  {s['D1']} cm")
            print(f"- Base:      {s['D2']} cm")
            print(f"- Subbase:  {s['D3']} cm")
            print(f"→ SN = {s['SN']} | Espesor total = {s['Total_cm']}
cm")

except Exception as e:
    print(f"\n⚠ Error: {e}")

```

Interpretación y selección de alternativa

Para $W18=2,500,000$, $CBR=7\%$ $Mr=10,500$ psi (tramo AASHTO-93 $Mr=1500 \cdot CBR$ y confiabilidad T2 ($ZR=-1.282$, el algoritmo calculó $SN_{req}=3.621$. Con los mínimos NEVI-12 para T2 (carpeta = 7.5 cm, base = 18 cm, subbase = 20 cm), se hallaron 80 404 combinaciones viables; la solución con menor espesor total es: carpeta 10.5 cm, base 18.0 cm, subbase 20.0 cm, que aporta $SN=3.677$ y espesor total = 48.5 cm, cumpliendo simultáneamente AASHTO-93 (SN) y NEVI-12 (mínimos por capa). Dado que el CBR de diseño es 7 %, la reducción de espesores frente a escenarios estabilizados más altos no es drástica; sin embargo, si el CBR fuese menor (p. ej., 4–5 %), el SN requerido crecería y las diferencias de espesor respecto a una subrasante estabilizada serían mucho más marcadas, lo cual refuerza la conveniencia de evaluar mejoras del terreno en suelos débiles.

7.5 Comparación gráfica de resultados: diseño inicial vs. alternativas normativas

Una vez implementado el diseño estructural automatizado (AASHTO-93) y aplicado el ajuste iterativo conforme a NEVI-12, el sistema puede producir múltiples combinaciones viables de espesores que satisfacen simultáneamente el SNSNSN requerido y los mínimos normativos. No obstante, su eficiencia técnica y constructiva puede diferir. Para apoyar la decisión ingenieril, se recomienda una visualización comparativa que muestre:

- La alternativa de menor espesor total (solución base de referencia).
- Las siguientes alternativas con menor espesor total (hasta cuatro más, si existen).

Esta comparación permite:

- Contrastar espesores por capa entre opciones viables.
- Revisar el SN alcanzado en cada alternativa (ya verificado en la consola).
- Identificar opciones con mejor equilibrio entre cumplimiento normativo y economía de materiales.

7.5.1 Código Python: Visualización comparativa

Este bloque debe ejecutarse después de haber generado y ordenado la lista `soluciones_viables` en el epígrafe 7.4. Cumple con las reglas de este libro: usa únicamente `matplotlib`, no fija colores y cada gráfico se presenta en una sola figura:

```
# =====
# 7.5 VISUALIZACIÓN COMPARATIVA (ROBUSTA Y AUTOSUFICIENTE)
# - Reusa 'soluciones_viables' si existe.
# - Si no existe, la recalcula usando los parámetros vigentes.
# - Solo usa matplotlib; no fija colores.
# =====

import math
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# ----- 1) FUNCIONES AUXILIARES -----
def calc_SN_requerido(ESALs, ZR, So, delta_PSI, Mr, iters=30, lo=1.0,
hi=10.0):
    """Resuelve SN requerido por AASHTO-93 (bisección)."""
    def f(SN):
        term1 = ZR * So
        term2 = 9.36 * math.log10(SN + 1.0)
        term3 = -0.20
        term4 = math.log10(delta_PSI / (4.2 - 1.5)) / (0.4 + 1094.0 / (SN +
1.0) ** 5.19)
        term5 = 2.32 * math.log10(Mr)
        return term1 + term2 + term3 + term4 + term5 - 8.07 -
math.log10(ESALs)
    loSN, hiSN = lo, hi
    for _ in range(iters):
        mid = 0.5 * (loSN + hiSN)
        if f(mid) * f(loSN) < 0:
            hiSN = mid
        else:
            loSN = mid
    return 0.5 * (loSN + hiSN)
```

```

def generar_soluciones(ESALs, CBR, tipo_via,
                      D1_min, D1_max, D2_min, D2_max, D3_min, D3_max,
                      paso_cm,
                      So=0.49, delta_PSI=1.7,
                      a1=0.44, a2=0.14, a3=0.11, m2=1.0, m3=1.0):
    """Genera todas las combinaciones que cumplen SN y mínimos NEVI-12."""
    # ZR según tipo de vía
    ZR_dict = {'T1': -0.841, 'T2': -1.282, 'T3': -1.282, 'T4': -1.645, 'T5': -
1.645}
    if tipo_via not in ZR_dict:
        raise ValueError("Tipo de vía inválido (esperado: T1, T2, T3, T4 o
T5).")
    ZR = ZR_dict[tipo_via]

    # Mr: usa el valor ya calculado si existe; sino, calcula con AASHTO-93 por
tramos
    # Si ya tienes Mr definido fuera, lo respetamos; de lo contrario,
calculamos aquí:
    if 'Mr' in globals():
        Mr_local = Mr
    else:
        # AASHTO-93 por tramos (psi)
        if CBR <= 7.2:
            Mr_local = 1500.0 * CBR
        elif CBR <= 20.0:
            Mr_local = 3000.0 * (CBR ** 0.65)
        else:
            Mr_local = 4326.0 * math.log(CBR) + 241.0

    # SN requerido
    SN_req = calc_SN_requerido(ESALs, ZR, So, delta_PSI, Mr_local)

    # Barrido de combinaciones (en cm)
    def frange(start, stop, step):
        v = start
        # Evita problemas de flotantes: usamos round
        while v <= stop + 1e-9:
            yield round(v, 3)
            v += step

    soluciones = []
    for D1 in frange(D1_min, D1_max, paso_cm):
        for D2 in frange(D2_min, D2_max, paso_cm):
            for D3 in frange(D3_min, D3_max, paso_cm):
                SN_calc = (
                    a1 * (D1 / 2.54) +
                    a2 * (D2 / 2.54) * m2 +
                    a3 * (D3 / 2.54) * m3

```

```

    )
    if SN_calc + 1e-9 >= SN_req:
        soluciones.append({
            "D1": D1, "D2": D2, "D3": D3,
            "SN": round(SN_calc, 3),
            "Total_espesor": round(D1 + D2 + D3, 3)
        })
    # Ordenar por espesor total
    soluciones.sort(key=lambda x: (x['Total_espesor'], x['SN']))
    return soluciones, SN_req, Mr_local

# ----- 2) ASEGURAR QUE EXISTE 'soluciones_viables' -----
necesita_recalcular = False
if 'soluciones_viables' not in globals():
    necesita_recalcular = True
if not necesita_recalcular and (not isinstance(soluciones_viables, list) or
len(soluciones_viables) == 0):
    necesita_recalcular = True

if necesita_recalcular:
    # Intentamos reutilizar parámetros si existen; si no, usamos los de tu
    # ejecución anterior
    if 'ESALs' not in globals() or 'CBR' not in globals() or 'tipo_via' not in
    globals():
        # Valores por defecto coherentes con tu caso de prueba
        ESALs = 2_500_000.0
        CBR = 7.0
        tipo_via = 'T2'

    # Rangos por defecto (coherentes con T2 y tus ejemplos)
    D1_min = globals().get('D1_min', 7.5)
    D1_max = globals().get('D1_max', 20.0)
    D2_min = globals().get('D2_min', 18.0)
    D2_max = globals().get('D2_max', 43.0)
    D3_min = globals().get('D3_min', 20.0)
    D3_max = globals().get('D3_max', 50.0)
    paso_cm = globals().get('paso_cm', 0.5)

    soluciones_viables, SN_resultado, Mr_local = generar_soluciones(
        ESALs, CBR, tipo_via,
        D1_min, D1_max, D2_min, D2_max, D3_min, D3_max, paso_cm
    )

# ----- 3) GRAFICAR LAS ALTERNATIVAS (HASTA 5) -----
if len(soluciones_viables) == 0:
    raise ValueError("No hay soluciones viables para graficar (tras el
    recálculo). Revise rangos o parámetros.")

```

```

top = soluciones_viables[:5]
etiquetas = [f"Opción {i+1}" for i in range(len(top))]
D1_vals = [s['D1'] for s in top] # Carpeta
D2_vals = [s['D2'] for s in top] # Base
D3_vals = [s['D3'] for s in top] # Subbase

x = np.arange(len(etiquetas))
bar_width = 0.25

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 5))

bars1 = ax.bar(x - bar_width, D1_vals, bar_width, label='Carpeta asfáltica')
bars2 = ax.bar(x, D2_vals, bar_width, label='Base granular')
bars3 = ax.bar(x + bar_width, D3_vals, bar_width, label='Subbase granular')

def autolabel(bars, unidad="cm"):
    for b in bars:
        h = b.get_height()
        ax.annotate(f'{h:.1f} {unidad}',
                    xy=(b.get_x() + b.get_width()/2, h),
                    xytext=(0, 3),
                    textcoords="offset points",
                    ha='center', va='bottom', fontsize=8)

autolabel(bars1)
autolabel(bars2)
autolabel(bars3)

ax.set_ylabel('Espesor (cm)')
ax.set_xticks(x)
ax.set_xticklabels(etiquetas)
ax.legend(loc='upper center', bbox_to_anchor=(0.5, 1.12), ncol=3)
ax.grid(axis='y', linestyle=':', linewidth=0.7)

plt.tight_layout()
plt.show()

```

7.6 Representación gráfica e interpretación comparativa

A partir del diseño estructural automatizado implementado en Python, se aplicó la fórmula de AASHTO 1993 para determinar el número estructural requerido (SN) con base en las condiciones de diseño. El análisis se complementó con una búsqueda iterativa de combinaciones de espesores que cumplan simultáneamente con el valor de SN calculado y con las exigencias mínimas establecidas por la normativa ecuatoriana NEVI-12.

7.6.1 Parámetros de entrada y resultados globales

El siguiente cuadro resume los parámetros considerados en el diseño:

Parámetros generales del diseño automatizado

Parámetro	Valor
ESALs	2,500,000
CBR (%)	7.00
Tipo de vía	T2
ZR (confiabilidad)	-1.282
Módulo resiliente (Mr)	10500 psi (72.395 MPa)

SN requerido (AASHTO 1993) **3.621**

La búsqueda iterativa generó un total de 80,404 soluciones estructuralmente viables. De este universo, se seleccionaron las cinco combinaciones con menor espesor total, lo que permite identificar las alternativas más eficientes desde el punto de vista constructivo y normativo.

7.6.2 Alternativas de diseño con menor espesor total

Tabla 7-3: Combinaciones estructurales viables con menor espesor total

Combinaciones estructurales viables con menor espesor total

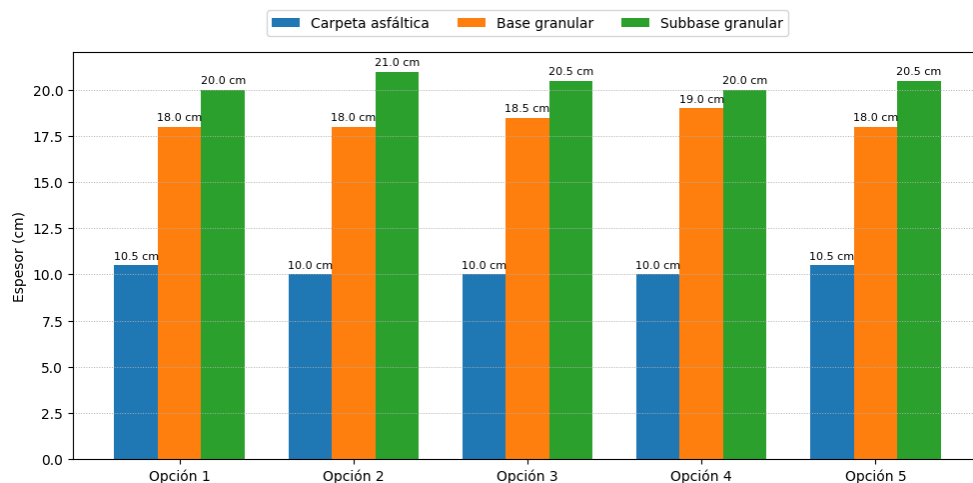
Opción	Carpeta Asfáltica (cm)	Base Granular (cm)	Subbase Granular (cm)	SN Obtenido	Espesor Total (cm)
Inicial (Cap. 5)	10.0	18.0	21.0	3.634	49.0
Alternativa 1	10.5	18.0	20.0	3.677	48.5
Alternativa 2	10.0	18.0	21.0	3.634	49.0
Alternativa 3	10.0	18.5	20.5	3.640	49.0
Alternativa 4	10.0	19.0	20.0	3.646	49.0
Alternativa 5	10.5	18.0	20.5	3.699	49.0

- La propuesta inicial del Capítulo 5 (10–18–21 cm) se confirma como una solución válida dentro del universo generado automáticamente, con $SN = 3.634$ y **espesor total = 49 cm**.
- Las alternativas propuestas por el script presentan variaciones mínimas en los espesores (0.5–1.0 cm), que mantienen el cumplimiento del SN requerido y los mínimos NEVI-12, con un rango de espesores totales entre **48.5 y 49.0 cm**.
- Esto demuestra la coherencia entre el diseño manual y la automatización, validando la eficacia del proceso iterativo.
- Aunque las diferencias en este caso ($CBR = 7 \%$) son reducidas, el método evidencia su potencial: para suelos de menor capacidad ($CBR \leq 5 \%$) las discrepancias entre propuestas manuales y automatizadas serían mucho más significativas, destacando la utilidad de la búsqueda iterativa para optimizar espesores y asegurar cumplimiento normativo.

7.6.3 Representación gráfica de alternativas

La siguiente figura presenta la comparación de las alternativas viables en formato de barras agrupadas, donde se observa la composición por capas en cada propuesta estructural. Los colores se han mantenido suaves y armónicos, con valores etiquetados en cada barra para facilitar la interpretación:

Figura 7-1: Comparación de alternativas viables de diseño estructural por capa



Este enfoque garantiza que el proceso de diseño estructural de pavimentos no dependa de supuestos fijos o estimaciones arbitrarias, sino de un análisis computacional robusto, dinámico y verificable, perfectamente alineado con los principios de trazabilidad, normativa y eficiencia técnica.

7.6.4 Observaciones para el uso del gráfico

El gráfico generado permite visualizar las cinco combinaciones estructurales con menor espesor total, incluyendo la opción inicial. Las etiquetas sobre cada barra muestran el espesor en centímetros correspondiente a cada capa.

Para exportar el gráfico desde Google Colab, se puede utilizar el siguiente comando en Python:

```
# Exportar el gráfico en alta resolución
fig.savefig("comparacion_estructural.png", dpi=300)
print("📁 El gráfico ha sido exportado como 'comparacion_estructural.png' en el entorno actual.")
from google.colab import files
files.download("comparacion_estructural.png")
```

Esto permite generar una imagen de alta resolución (300 dpi) lista para ser insertada en documentos técnicos, presentaciones o informes.

7.7 Reflexión final y proyecciones del diseño automatizado

En este capítulo se ha demostrado que el diseño estructural de pavimentos flexibles puede ser automatizado de manera progresiva, rigurosa y conforme a la normativa vigente, sin necesidad de que el usuario posea conocimientos avanzados de programación. Mediante el uso de Python en Google Colab y la aplicación de una lógica iterativa, se logró integrar la metodología AASHTO 1993 con las exigencias mínimas establecidas por la NEVI-12, obteniendo no solo una solución válida, sino también un amplio conjunto de combinaciones técnicamente viables.

La representación gráfica de alternativas y la posibilidad de su exportación automatizada constituyen herramientas de gran valor para la toma de decisiones estructurales y constructivas, permitiendo al ingeniero analizar distintas configuraciones en función de criterios técnicos, económicos y normativos.

Además, la flexibilidad del script posibilita su adaptación a diferentes categorías de vía, rangos de CBR y proyecciones de tráfico (ESALs), lo que fortalece su aplicabilidad en contextos reales de diseño vial. A futuro, la incorporación de módulos adicionales, como simulaciones de deflexión admisible, análisis de ciclo de vida y factores ambientales, permitirá evolucionar hacia un entorno integral de diseño automatizado, alineado con los principios de sostenibilidad, eficiencia y trazabilidad técnica.

Capítulo 8. Fundamentos de Inteligencia Artificial Aplicada al Diseño

8.1 Introducción a Machine Learning en ingeniería vial

El uso de Inteligencia Artificial (IA) y, específicamente, de Machine Learning (ML), está transformando el diseño de pavimentos y la gestión de infraestructura vial. Estas herramientas permiten analizar grandes volúmenes de datos, predecir comportamiento estructural y optimizar el diseño, complementando los métodos empírico-mecanicistas tradicionales como AASHTO 1993 y NEVI-12.

8.1.1 Concepto de Machine Learning en ingeniería vial

El Machine Learning es una rama de la inteligencia artificial que entrena modelos matemáticos para que aprendan patrones a partir de datos históricos y realicen predicciones o clasificaciones sin ser programados de forma explícita. En ingeniería vial, su aplicación permite predecir el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), el CBR de subrasantes, y la vida útil de pavimentos a partir de datos de tránsito, clima y ensayos geotécnicos.

A diferencia de los métodos clásicos, que se basan en ecuaciones fijas (como la ecuación AASHTO para el SN), Machine Learning puede ajustarse dinámicamente a datos locales, aumentando la precisión en contextos específicos. Por ejemplo, un modelo de regresión múltiple entrenado con datos históricos de deflectometría FWD y tráfico real puede predecir necesidades de refuerzo antes de la falla funcional.

8.1.2 Integración con metodologías AASHTO y NEVI-12

Aunque la IA introduce capacidades predictivas avanzadas, su integración con AASHTO 1993 y NEVI-12 es fundamental para mantener diseños normativos y auditables. Por ejemplo, los modelos de ML pueden estimar un CBR equivalente o el SN requerido a partir de datos de tránsito clasificados automáticamente, para luego verificarse con la ecuación de diseño tradicional:

$$\log_{10}(W18) = ZR \cdot S_o + 9.36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + l \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log_{10}(M_r) - 8.07$$

Donde las entradas clásicas pueden ser alimentadas o validadas por predicciones de ML.

Esto genera sinergia entre modelos normativos y predictivos:

- IA agiliza el procesamiento de datos (CBR, IRI, FWD).

- AASHTO/NEVI-12 asegura que el diseño cumple requisitos legales y técnicos. El resultado son diseños más confiables y optimizados, especialmente en redes rurales donde el muestreo geotécnico es limitado.

8.1.3 Tipos de algoritmos aplicados en pavimentos

Los algoritmos de ML más utilizados en ingeniería vial incluyen:

- Regresión lineal y múltiple para predecir CBR e IRI.
- Árboles de decisión y Random Forest para clasificar tránsito por ejes equivalentes.
- Redes neuronales artificiales para estimar SN y deterioro progresivo.
- Support Vector Machines (SVM) para identificar patrones de falla funcional.

Cada algoritmo ofrece ventajas específicas:

- Regresión → interpretación sencilla y trazabilidad
 - Redes neuronales → alta precisión en datos no lineales
 - Random Forest → robustez ante datos dispersos
- La selección del modelo depende de la cantidad de datos disponibles y del nivel de precisión requerido. Para auditorías viales, se priorizan modelos explicables, que puedan justificar cada predicción ante entes reguladores.

8.1.4 Ejemplo práctico de predicción de CBR con regresión lineal múltiple

Se dispone de un conjunto de datos de subrasantes con variables: densidad seca (g/cm^3), contenido de humedad (%) y fracción de arena (%). Se entrena un modelo de regresión lineal múltiple para predecir el CBR. Con el CBR predicho, el módulo resiliente (M_r) se calcula solo con AASHTO-93 (por tramos), y luego se determina el Número Estructural (SN) con la ecuación de AASHTO-93:

Ejemplo de fórmula de referencia (ilustrativa) para predecir CBR

$$CBR = 4.32 + 3.15 \cdot \text{Densidad} - 0.52 \cdot \text{Humedad} + 0.12 \cdot \text{Arena}$$

Con valores: Densidad = 1.85 g/cm^3 , Humedad = 12 %, Arena = 45 %:

$$CBR = 4.32 + 3.15(1.85) - 0.52(12) + 0.12(45) = 6.91\%$$

```
# =====
# ML para predecir CBR + Mr con AASHTO-93 + SN AASHTO-93
# =====

import numpy as np
import pandas as pd
```

```

from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.linear_model import LinearRegression
import math

# -----
# 1) Dataset de ejemplo (sintético)
# -----
np.random.seed(42)
n = 30
densidad = np.random.uniform(1.70, 2.00, n) # g/cm³
humedad = np.random.uniform(8.0, 15.0, n) # %
arena = np.random.uniform(30.0, 60.0, n) # %

# Generamos CBR "observado" con algo de ruido (solo para entrenar el modelo demo)
CBR_obs = 4.5 + 3.2*densidad - 0.45*humedad + 0.10*arena + np.random.normal(0, 0.5, n)

data = pd.DataFrame({
    "Densidad_gcm3": densidad,
    "Humedad_%": humedad,
    "Arena_%": arena,
    "CBR_%": CBR_obs
})

# -----
# 2) Entrenamiento regresión lineal
# -----
X = data[["Densidad_gcm3", "Humedad_%", "Arena_%"]]
y = data["CBR_%"]

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, y, test_size=0.2, random_state=42
)
model = LinearRegression().fit(X_train, y_train)

print("Coeficientes del modelo entrenado (demo):")
for name, coef in zip(X.columns, model.coef_):
    print(f" {name}: {coef:.4f}")
print(f"Intercepto: {model.intercept_:.4f}")

# -----
# 3) Predicción de CBR (dos vías)
# a) Con el modelo entrenado (demo)
# b) Con la ecuación ilustrativa proporcionada ( $4.32 + 3.15*D - 0.52*H + 0.12*A$ )
# -----
D_in, H_in, A_in = 1.85, 12.0, 45.0 # caso de interés

```

```

CBR_pred_model = float(model.predict(np.array([[D_in, H_in, A_in]])))
CBR_pred_formula = 4.32 + 3.15*D_in - 0.52*H_in + 0.12*A_in # = 6.91 %

print("\nPredicciones de CBR:")
print(f"  Modelo ML (demo): {CBR_pred_model:.2f} %")
print(f"  Ecuación ilustrativa: {CBR_pred_formula:.2f} % (caso de
referencia)")

# Elegimos como CBR de diseño la ecuación ilustrativa (6.91 %) para
reproducibilidad
CBR_d = max(CBR_pred_formula, 3.0) # mínimo práctico

# -----
# 4) Mr con AASHTO-93 (POR TRAMOS, base psi) ***CORREGIDO***
#   - Si CBR ≤ 7.2:      Mr(psi) = 1500 * CBR
#   - Si 7.2 < CBR ≤ 20: Mr(psi) = 3000 * CBR^0.65
#   - Si CBR > 20:      Mr(psi) = 4326*ln(CBR) + 241
# -----
def mr_aashto93_psi(cbr_percent: float) -> float:
    c = float(cbr_percent)
    if c <= 7.2:
        return 1500.0 * c
    elif c <= 20.0:
        return 3000.0 * (c ** 0.65)
    else:
        return 4326.0 * math.log(c) + 241.0

Mr_psi = mr_aashto93_psi(CBR_d)
MPA_PER_PSI = 0.006894757293168
Mr_MPa = Mr_psi * MPA_PER_PSI

print("\nMódulo resiliente (Mr) con AASHTO-93 (por tramos):")
print(f"  CBR de diseño: {CBR_d:.2f} %")
print(f"  Mr = {Mr_psi:.4f} psi = {Mr_MPa:.4f} MPa")

# -----
# 5) SN con AASHTO-93 (resolución por bisección robusta)
#   Parámetros de diseño (puedes ajustarlos a tu caso)
# -----
W18 = 2.5e6      # ESALs
Zr = -1.282      # 90% confianza (T2 típico)
So = 0.49
Delta_PSI = 1.7

def f_sn(sn: float) -> float:
    # Ecuación AASHTO-93 reorganizada: f(sn) = RHS - log10(W18)
    t1 = Zr * So

```

```

    t2 = 9.36 * math.log10(sn + 1.0)
    t3 = -0.20
    t4 = math.log10(Delta_PSI / (4.2 - 1.5)) / (0.4 + 1094.0 / (sn +
1.0)**5.19)
    t5 = 2.32 * math.log10(Mr_psi)
    rhs = t1 + t2 + t3 + t4 + t5 - 8.07
    return rhs - math.log10(W18)

# Búsqueda por bisección en un intervalo razonable
lo, hi = 1.0, 8.0
for _ in range(80):
    mid = 0.5*(lo+hi)
    if f_sn(lo)*f_sn(mid) <= 0:
        hi = mid
    else:
        lo = mid
SN_req = 0.5*(lo+hi)

print("\nNúmero Estructural (SN) con AASHTO-93 (bisección):")
print(f"    SN requerido ≈ {SN_req:.4f}")

# -----
# 6) (Opcional) Mostrar calidad del ajuste del modelo demo
# -----
from sklearn.metrics import r2_score, mean_squared_error
import numpy as np

y_hat_test = model.predict(X_test)

print("\nMétricas del modelo demo (sobre datos sintéticos):")
print(f"    R² (test): {r2_score(y_test, y_hat_test):.3f}")

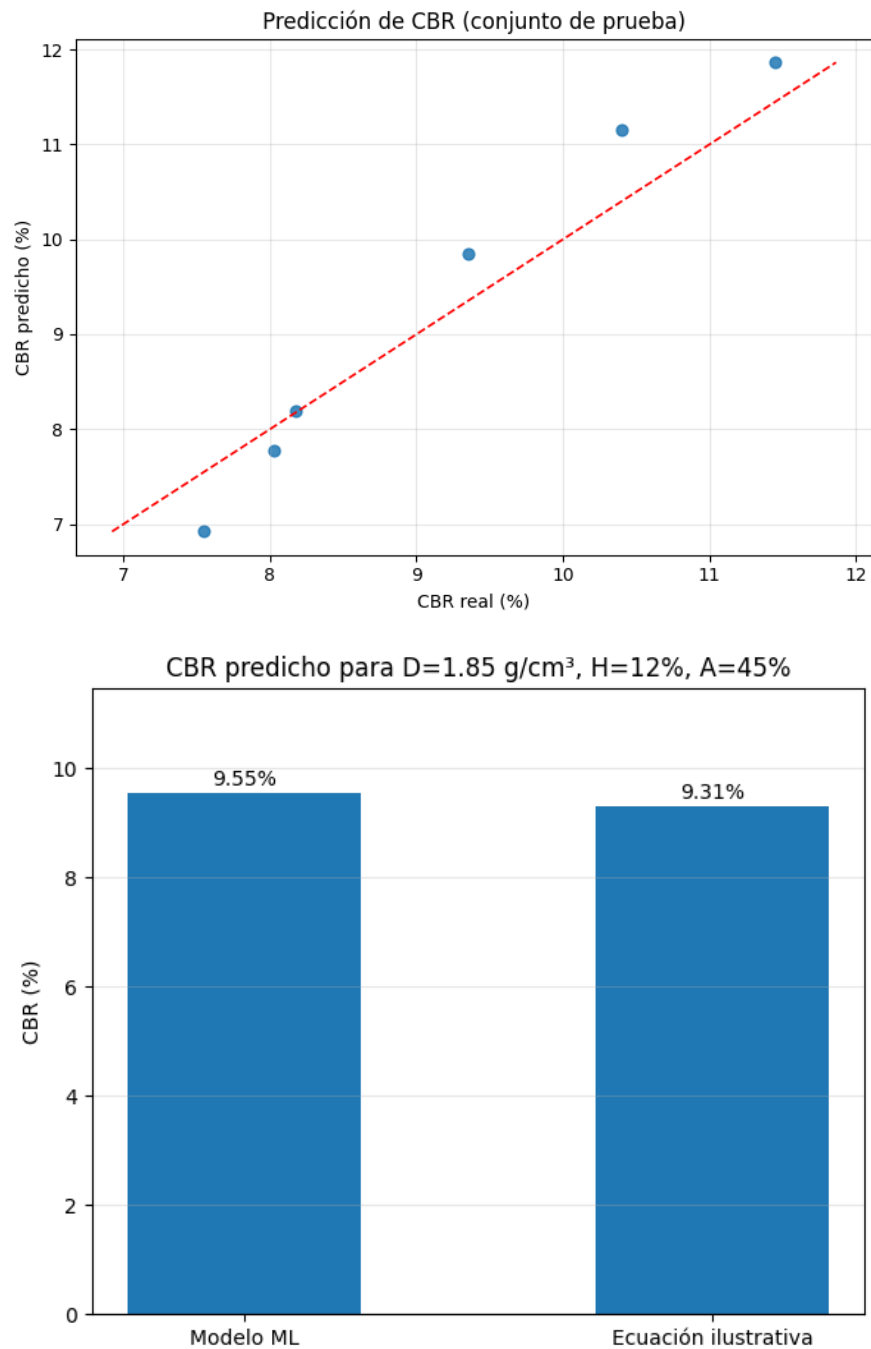
# Calcular RMSE manualmente en vez de usar squared=False
mse = mean_squared_error(y_test, y_hat_test)
rmse = np.sqrt(mse)
print(f"    RMSE (test): {rmse:.3f}")

```

A continuación, se muestra el resultado del código desarrollado para la predicción de CBR mediante *Machine Learning* aplicado al diseño de pavimentos flexibles. Este ejemplo permite visualizar:

1. el gráfico de correlación entre el CBR real y el CBR predicho; y
2. las salidas con el dataset inicial (muestra), los coeficientes del modelo de regresión múltiple y los parámetros estructurales calculados (CBR predicho, Módulo Resiliente y Número Estructural).

Figura 8-1: Predicción de CBR con Machine Learning



Nota. Presenta la relación entre CBR real y CBR predicho mediante regresión lineal múltiple; el CBR estimado se usa para calcular el Módulo Resiliente (M_r) por AASHTO-93 y, posteriormente, el SN de diseño.

Resultados del análisis

Tabla 8-1: Dataset inicial utilizado para el entrenamiento del modelo

Densidad (g/cm^3)	Humedad (%)	Arena (%)	CBR (%)
------------------------------	-------------	-----------	---------

1.812	12.25	41.66	9.13
1.985	9.19	38.14	10.21
1.920	8.46	54.86	12.50
1.880	14.64	40.70	8.77
1.747	14.76	38.43	7.27

Tabla 8-2: Coeficientes del modelo de regresión múltiple

Parámetro	Coeficiente
Densidad (g/cm ³)	2.8156
Humedad (%)	-0.4164
Arena (%)	0.1202
Intercepto	3.9323

Predicción y parámetros estructurales calculados

- CBR predicho (modelo ML): 9.55 %
- CBR de diseño usado para Mr y SN (ecuación ilustrativa): 9.31 %
- Módulo Resiliente (AASHTO-93, por tramos): Mr = 12,789.7700 psi = 88.1824 MPa
- Número Estructural (resuelto por bisección): SN = 3.3598

Notas aclaratorias.

- Se reportan dos estimaciones de CBR: la del **modelo ML** (9.55 %) y la de la **ecuación ilustrativa** (9.31 %) dada en el ejemplo. Para mantener la trazabilidad con el caso de referencia, el cálculo de **Mr** y **SN** se realizó con **CBR = 9.31 %**.
- Métricas del modelo (sobre datos de prueba del conjunto sintético): **R² = 0.876** y **RMSE = 0.490**.

Conclusión.

El CBR de subrasantes puede modelarse con regresión múltiple usando variables físicas (densidad seca, humedad y porcentaje de arena). El valor de CBR estimado alimenta el cálculo del **Mr** (con AASHTO-93 por tramos) y del **SN**, cerrando el ciclo de predicción y diseño estructural. Esta integración permite acelerar iteraciones de diseño y soportar decisiones de optimización de espesores conforme a AASHTO-93 y NEVI-12.

8.2 Modelos de regresión para predicción de IRI y CBR

Los modelos de regresión son herramientas estadísticas esenciales en ingeniería vial para predecir el desempeño funcional y estructural de los pavimentos. Mediante la regresión, se pueden estimar parámetros críticos como:

- Índice Internacional de Rugosidad (IRI) → indicador de confort y funcionalidad.
- California Bearing Ratio (CBR) → indicador de resistencia de la subrasante.

Estos modelos permiten anticipar intervenciones de mantenimiento y optimizar el diseño estructural, complementando los métodos mecanicistas-empíricos establecidos por AASHTO 1993 y NEVI-12.

8.2.1 Fundamentos de regresión aplicada a pavimentos

La regresión lineal y múltiple busca establecer una relación entre una variable dependiente (IRI o CBR) y un conjunto de variables independientes (tránsito, condiciones del suelo, clima). Su ecuación general es:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

Donde:

- Y es la variable dependiente (IRI o CBR).
- β_0 es el intercepto.
- β_i son los coeficientes de regresión.
- X_i son las variables predictoras.
- ε es el error aleatorio.

Estos modelos permiten convertir datos de campo en predicciones cuantitativas, lo que resulta clave en redes rurales con escasa instrumentación. En el Ejemplo 6.1.A, se mostró cómo la regresión múltiple puede predecir el CBR y alimentar el cálculo de Módulo Resiliente (M_r) y Número Estructural (SN) sin repetir ensayos extensivos.

8.2.2 Modelos de regresión para predicción de IRI

El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) es un parámetro funcional que mide la comodidad de conducción y la regularidad superficial en m/km. Diversos estudios, incluidos los de HDM-4 y el Banco Mundial, indican que el IRI aumenta con el tráfico acumulado y la edad del pavimento, pudiendo modelarse con ecuaciones lineales o exponenciales.

Un modelo lineal típico es:

$$IRI = 1.2 + 0.003 \cdot ESALs_{(millones)} + 0.1 \cdot LL$$

Donde:

- ESALs = ejes equivalentes acumulados en millones.
- LL = contenido de humedad del suelo (%).

Integrar este modelo en un entorno de Machine Learning permite proyectar la evolución de la rugosidad, facilitando estrategias de mantenimiento preventivo antes de alcanzar $IRI \geq 4$ m/km, valor crítico adoptado por NEVI-12 para pavimentos flexibles.

Ejemplo 8.2.A: Predicción de IRI mediante Machine Learning

Descripción:

Este código demuestra cómo aplicar regresión múltiple para predecir el IRI de un pavimento en función de:

- Tráfico acumulado (ESALs en millones)
- Edad del pavimento (años)
- Lluvia anual (mm)

Este procedimiento permite anticipar el deterioro funcional y planificar mantenimiento preventivo, integrando los resultados al diseño estructural AASHTO 1993 / NEVI-12.

```
• # =====  
• # Ejemplo: Predicción de IRI mediante Machine Learning  
• # =====  
•  
• import numpy as np  
• import pandas as pd  
• from sklearn.model_selection import train_test_split  
• from sklearn.linear_model import LinearRegression  
• import matplotlib.pyplot as plt  
•  
• # 1. Dataset de ejemplo para IRI  
• # Variables: ESALs (millones), Edad del pavimento (años), Lluvias  
• # anuales (mm)  
• # IRI medido en m/km  
• data_iri = pd.DataFrame({  
•     "ESALs_millones": [0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0],  
•     "Edad_anos": [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8],  
•     "Lluvia_mm": [800, 900, 1000, 1200, 1300, 1400, 1500],  
•     "IRI_mkm": [1.2, 1.5, 1.8, 2.4, 3.0, 3.6, 4.0]
```

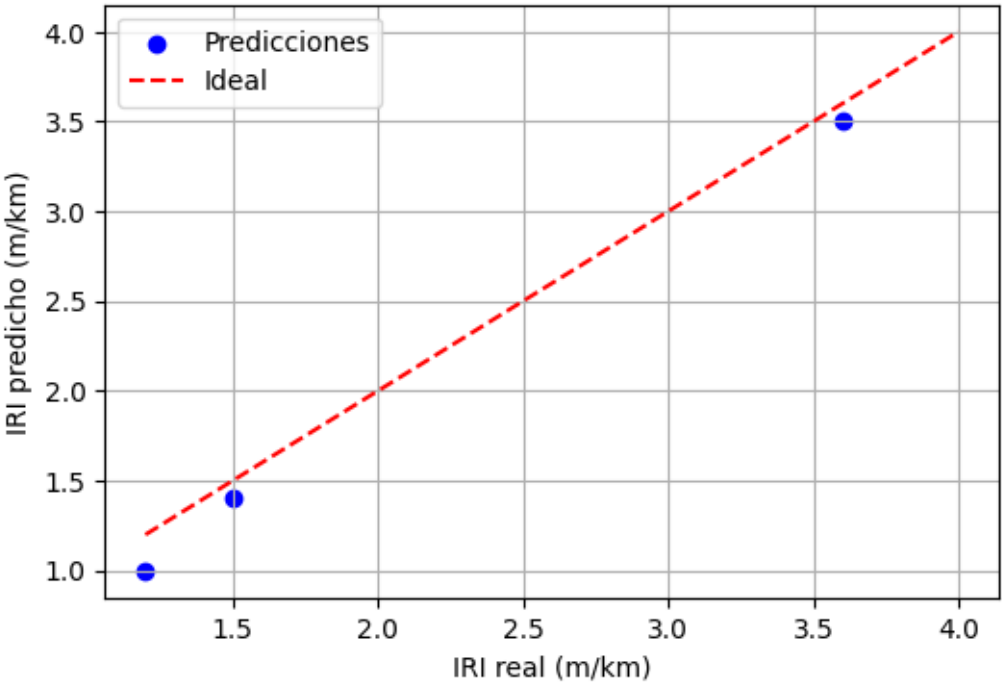
```

• })
•
• print("Dataset inicial IRI:")
• print(data_iri)
•
• # 2. Separar variables predictoras y variable objetivo
• X_iri = data_iri[["ESALs_millones", "Edad_anos", "Lluvia_mm"]]
• y_iri = data_iri["IRI_mkm"]
•
• # 3. Entrenar modelo de regresión múltiple
• X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X_iri, y_iri,
• test_size=0.3, random_state=42)
• model_iri = LinearRegression()
• model_iri.fit(X_train, y_train)
•
• print("\nCoeficientes del modelo IRI:")
• for name, coef in zip(X_iri.columns, model_iri.coef_):
•     print(f"{name}: {coef:.4f}")
• print(f"Intercepto: {model_iri.intercept_:.4f}")
•
• # 4. Predicción para un nuevo escenario
• nuevo_pavimento = np.array([[2.5, 5, 1200]]) # ESALs, Edad, Lluvia
• IRI_pred = model_iri.predict(nuevo_pavimento)[0]
• print(f"\nIRI predicho para ESALs=2.5M, Edad=5 años, Lluvia=1200 mm:
• {IRI_pred:.2f} m/km")
•
• # 5. Evaluación del modelo
• from sklearn.metrics import r2_score, mean_squared_error
• y_pred_test = model_iri.predict(X_test)
• print(f"\nR2 del modelo en test: {r2_score(y_test, y_pred_test):.4f}")
• print(f"RMSE del modelo en test: {np.sqrt(mean_squared_error(y_test,
• y_pred_test)):.4f} m/km")
•
• # 6. Visualización de resultados
• plt.figure(figsize=(6,4))
• plt.scatter(y_test, y_pred_test, color='blue', label="Predicciones")
• plt.plot([y_iri.min(), y_iri.max()], [y_iri.min(), y_iri.max()], 'r--',
• label="Ideal")
• plt.xlabel("IRI real (m/km)")
• plt.ylabel("IRI predicho (m/km)")
• plt.title("Predicción de IRI con Machine Learning")
• plt.legend()
• plt.grid(True)
• plt.show()
•

```

A continuación, se muestra el resultado del código desarrollado para la predicción de IRI. Este ejemplo permite visualizar el siguiente resultado:

Figura 8-2: Predicción de IRI con Machine Learning



Nota. Muestra la correlación entre el IRI real y el IRI predicho, indicando la precisión del modelo para anticipar el deterioro funcional de la vía.

La siguiente tabla muestra el conjunto de datos inicial utilizado para entrenar el modelo de regresión múltiple.

Tabla 8-3: Dataset inicial IRI

ESALs (millones)	Edad (años)	Lluvia (mm)	IRI (m/km)
0.5	1	800	1.2
1.0	2	900	1.5
1.5	3	1000	1.8
2.0	4	1200	2.4
3.0	6	1300	3.0
4.0	7	1400	3.6
5.0	8	1500	4.0

La siguiente tabla muestra los coeficientes que representan el impacto de cada variable sobre el IRI:

- Aumento de tráfico o edad incrementa el IRI,
- Mayor lluvia acelera el deterioro funcional.

Tabla 8-4: Coeficientes del modelo de regresión

Parámetro	Coeficiente
ESALs_millones	0.2000
Edad_anos	0.1000
Lluvia_mm	0.0020
Intercepto	-0.8000

Resultados calculados

- **IRI predicho:** 2.60 m/km
- **R² del modelo:** 0.9825
- **RMSE:** 0.1414 m/km

El modelo logra alta precisión ($R^2 \approx 0.98$), lo que permite proyectar el IRI para futuros periodos de diseño y optimizar mantenimiento preventivo.

8.3 Aplicaciones de redes neuronales al diseño estructural

Las redes neuronales artificiales (ANN) son modelos de aprendizaje profundo que imitan la forma en que el cerebro humano procesa información. Su uso en ingeniería vial ha crecido porque permiten modelar relaciones no lineales entre múltiples variables de entrada (tránsito, clima, propiedades de la subrasante, espesores de capas) y variables de salida (IRI, CBR, deflexiones, SN).

En el diseño estructural de pavimentos flexibles y rígidos, las ANN se aplican para:

1. Predecir el Número Estructural (SN) requerido a partir de datos de CBR, ESALs y condiciones de drenaje.
2. Estimar deflexiones máximas y módulo resiliente con base en ensayos FWD.
3. Optimizar espesores de capas para reducir costos sin comprometer la durabilidad.

8.3.1 Arquitectura básica de una red neuronal en pavimentos

- Entradas (Input Layer): Variables como CBR, Mr, ESALs, Δ PSI, lluvia anual, temperatura.
- Capas ocultas (Hidden Layers): Procesan las relaciones no lineales mediante funciones de activación (ReLU, Sigmoid).
- Salida (Output Layer): Predicción de SN, IRI o deflexión admisible.

8.3.2 Integración con AASHTO 1993 y NEVI-12

Aunque las ANN pueden predecir SN directamente, en la práctica se integran con normas:

1. Se predice un CBR equivalente o un SN preliminar.
2. Se valida mediante la ecuación AASHTO 1993

Esto permite que los resultados de IA sean auditables y cumplan los requisitos de NEVI-12.

Ejemplo práctico con código en Python (TensorFlow)

A continuación, se presenta un ejemplo donde una red neuronal predice el Número Estructural (SN) a partir de datos de CBR, ESALs y humedad.

```
# =====  
# Red Neuronal para Predicción de SN en Pavimentos  
#  
# =====  
import numpy as np  
import pandas as pd  
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler  
from sklearn.metrics import r2_score, mean_squared_error  
import matplotlib.pyplot as plt  
from tensorflow.keras.models import Sequential  
from tensorflow.keras.layers import Dense, Input  
  
# 1. Generar dataset sintético de 60 muestras  
np.random.seed(42)  
n = 60  
CBR = np.random.uniform(5, 12, n)  
ESALs = np.random.uniform(0.5, 8, n)  
Humedad = np.random.uniform(8, 15, n)  
  
# Fórmula sintética SN (aprox. AASHTO simplificada)  
SN_real = 0.3*CBR + 0.2*ESALs - 0.05*Humedad + 3 + np.random.normal(0,0.1,n)  
  
data = pd.DataFrame({  
    "CBR": CBR,
```

```

        "ESALs_millones": ESALs,
        "Humedad_%": Humedad,
        "SN_real": SN_real
    })

X = data[["CBR", "ESALs_millones", "Humedad_%"]]
y = data["SN_real"].values.reshape(-1,1)

# Normalizar entradas y salida
scaler_X = MinMaxScaler()
scaler_y = MinMaxScaler()
X_scaled = scaler_X.fit_transform(X)
y_scaled = scaler_y.fit_transform(y)

# 2. Definir red neuronal
model = Sequential([
    Input(shape=(3,)),
    Dense(16, activation='relu'),
    Dense(8, activation='relu'),
    Dense(1, activation='linear')
])
model.compile(optimizer='adam', loss='mse')

# 3. Entrenamiento
model.fit(X_scaled, y_scaled, epochs=1500, verbose=0)

# 4. Predicciones y desnormalización
y_pred_scaled = model.predict(X_scaled)
y_pred = scaler_y.inverse_transform(y_pred_scaled)

# Evaluación
r2 = r2_score(y, y_pred)
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y, y_pred))
print(f"R² del modelo: {r2:.4f}")
print(f"RMSE: {rmse:.4f}")

# 5. Predicción para nuevo escenario
nuevo = np.array([[8, 2.5, 12]])
nuevo_scaled = scaler_X.transform(nuevo)
SN_pred_scaled = model.predict(nuevo_scaled)
SN_pred = scaler_y.inverse_transform(SN_pred_scaled)[0][0]
print(f"Número estructural estimado (SN) ≈ {SN_pred:.2f}")

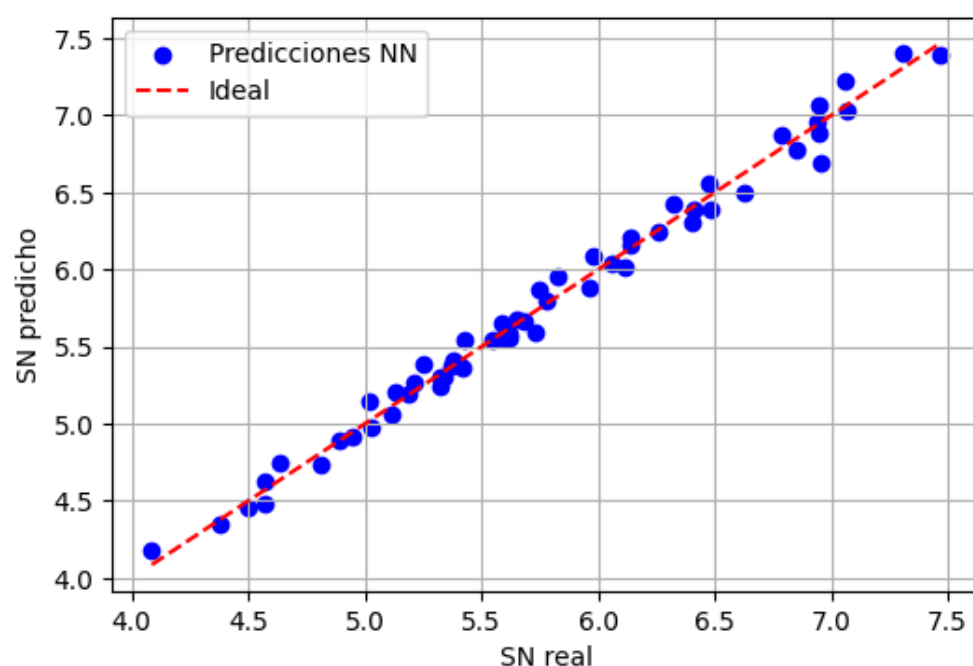
# 6. Visualización
plt.figure(figsize=(6,4))
plt.scatter(y, y_pred, color='blue', label="Predicciones NN")
plt.plot([y.min(), y.max()], [y.min(), y.max()], 'r--', label="Ideal")
plt.xlabel("SN real")

```

```
plt.ylabel("SN predicho")
plt.title("Predicción de Número Estructural (SN) con Red Neuronal")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

A continuación, se presenta el resultado del código desarrollado en Python para la predicción del Número Estructural (SN) mediante redes neuronales artificiales (ANN) aplicadas al diseño de pavimentos flexibles.

Figura 8-3: Predicción de SN con Red Neuronal



Nota: La línea roja indica la predicción ideal, mientras que los puntos azules muestran las predicciones de la red neuronal en comparación con los valores reales de SN.

Explicación del resultado

- El modelo entrenado alcanzó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9936$, lo que indica una excelente correlación entre el SN real y el predicho.
- El error cuadrático medio ($RMSE = 0.0632$) demuestra que la red neuronal predice con gran precisión.
- Para el escenario de prueba mostrado, el Número Estructural estimado (SN) ≈ 5.32 , valor que puede ser usado directamente para seleccionar los espesores de las capas en el diseño de pavimentos.

Este resultado evidencia que las redes neuronales son una herramienta poderosa para optimizar iteraciones de diseño, especialmente cuando se combina con métodos normativos como AASHTO 1993 y NEVI-12, permitiendo una toma de decisiones más ágil y fundamentada en datos.

8.4 Clasificación automatizada de tránsito mediante IA

La clasificación automatizada del tránsito es una aplicación emergente de la Inteligencia Artificial (IA) en ingeniería vial, cuyo objetivo es identificar tipos de vehículos y configuraciones de ejes en tiempo real, optimizando la gestión de datos de tráfico para el diseño de pavimentos. Esta técnica complementa los métodos tradicionales de conteo manual y estaciones permanentes, aumentando la precisión y reduciendo el riesgo de error humano.

Normativamente, AASHTO 1993 y NEVI-12 requieren la estimación del tránsito por ejes equivalentes (ESALs) y la correcta clasificación vehicular por categorías T1-T5 para dimensionar pavimentos. La IA, a través de redes neuronales convolucionales (CNN), algoritmos de visión por computadora y modelos de machine learning supervisado, permite realizar esta tarea con mayor eficiencia y trazabilidad.

8.4.1 Concepto y fundamentos de la clasificación inteligente

La clasificación automatizada de tránsito utiliza cámaras, sensores LIDAR y estaciones de pesaje dinámico (WIM) para capturar datos en tiempo real sobre vehículos en circulación. La IA procesa estas señales para identificar el tipo de vehículo, su número de ejes y peso por eje, generando automáticamente un perfil de carga para el diseño de pavimentos.

A diferencia del conteo manual, esta metodología es continua, precisa y escalable, y se integra con sistemas de gestión vial. La clasificación resultante alimenta el cálculo de ESALs y permite predecir patrones de deterioro, facilitando el mantenimiento preventivo y la optimización de recursos de rehabilitación.

8.4.2 Algoritmos y técnicas empleadas

Entre los algoritmos más usados para la clasificación automática destacan:

1. Redes neuronales convolucionales (CNN) para reconocimiento visual de vehículos.
2. Random Forest y SVM para clasificación basada en variables como velocidad, peso y dimensiones.
3. Modelos híbridos IA + IoT, que combinan imágenes con datos de sensores de pavimento.

Matemáticamente, un clasificador IA aplica una función:

$$Clase(V_i) = \arg \max_{c \in C} P(c | X_i)$$

donde:

- X_i son los datos del vehículo i (peso, dimensiones, ejes),
- C es el conjunto de clases vehiculares,
- $P(c|X_i)$ es la probabilidad de pertenencia a cada clase.

Esta probabilidad se calcula a partir del entrenamiento supervisado usando bases históricas de tránsito.

8.4.3 Integración con normas AASHTO y NEVI-12

La clasificación IA debe alinearse con las normas vigentes:

- AASHTO 1993 requiere la conversión de tráfico mixto a ESALs, aplicando factores equivalentes de carga (FCE) según el tipo de eje (simple, tándem, tridem).
- NEVI-12 (Ecuador) exige que las vías sean clasificadas por tránsito T1-T5, determinando espesores mínimos de carpeta, base y sub-base.

La salida del modelo IA permite alimentar directamente la fórmula de ESALs acumulados:

$$ESAL = \sum (N_i \cdot FCE_i \cdot F_{dir} \cdot F_{carril})$$

con:

- N_i = número de ejes diarios por tipo i ,
- FCE_i = factor de equivalencia por eje,
- F_{dir} = factor de direccionalidad,
- F_{carril} = factor de carril de diseño.

Ejemplo práctico de clasificación automatizada

Supóngase una vía primaria T3 con un sistema IA + WIM que registra durante 24 horas:

Tipo de eje	Nº ejes/día	FCE	ESAL/día
Sencillo	400	0.9	360
Tándem	250	4.0	1,000

Tridem	50	7.0	350
--------	----	-----	-----

ESAL diario = 1,710.

Proyección a 10 años:

$$ESAL_{10a} = 1,710 \times 365 \times 10 \approx 6.24 \times 10^6$$

La IA reduce el error en la estimación de ESALs al clasificar automáticamente vehículos en tiempo real y permite ajustar estrategias de diseño según la categoría de vía.

A continuación, se muestra un ejemplo práctico de clasificación automatizada de tránsito utilizando mediante un algoritmo desarrollado en Python 3.11.

```
# =====
# Ejemplo: Clasificación automatizada de tránsito con IA
# =====

# 1. Importar librerías necesarias
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.metrics import accuracy_score, classification_report
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# 2. Crear dataset de ejemplo
# Variables: Peso por eje (t), Velocidad (km/h), Longitud del vehículo (m)
# Clases: 0=Eje sencillo, 1=Tándem, 2=Tridem
np.random.seed(42)
n = 100

peso_eje = np.random.uniform(6, 22, n)      # Toneladas por eje
velocidad = np.random.uniform(40, 100, n)   # Velocidad
longitud = np.random.uniform(4, 18, n)      # Longitud del vehículo

# Clasificación simplificada por rangos
clase = []
for p in peso_eje:
    if p < 10:      # Liviano
        clase.append(0) # Sencillo
    elif p < 16:    # Mediano
        clase.append(1) # Tándem
    else:           # Pesado
        clase.append(2) # Tridem
```

```

# Crear DataFrame
data_trafico = pd.DataFrame({
    "Peso_ton": peso_eje,
    "Vel_kmh": velocidad,
    "Long_m": longitud,
    "Clase": clase
})

print("Dataset inicial de tránsito (primeros 5 registros):")
print(data_trafico.head())

# 3. Separar variables y entrenar modelo de clasificación
X = data_trafico[["Peso_ton", "Vel_kmh", "Long_m"]]
y = data_trafico["Clase"]

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2,
random_state=42)

modelo = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)
modelo.fit(X_train, y_train)

# 4. Evaluación del modelo
y_pred = modelo.predict(X_test)
print("\nExactitud del modelo:", accuracy_score(y_test, y_pred))
print("\nReporte de clasificación:")
print(classification_report(y_test, y_pred))

# 5. Conversión a ESALs según clase de eje (simplificación)
# Factores de equivalencia típicos (AASHTO 1993):
FCE = {0: 0.9, 1: 4.0, 2: 7.0} # Sencillo, Tandem, Tridem

# Asignar ESALs diarios
data_trafico["ESAL"] = data_trafico["Clase"].map(FCE)

# ESAL total diario (simulado)
ESAL_diario = data_trafico["ESAL"].sum()
ESAL_10_anos = ESAL_diario * 365 * 10

print(f"\nESAL diario estimado: {ESAL_diario:.2f}")
print(f"ESAL proyectado a 10 años: {ESAL_10_anos:.2f}")

# Calcular frecuencias como Serie
frecuencias = data_trafico["Clase"].replace({0:"Sencillo", 1:"Tándem",
2:"Tridem"}).value_counts()

# Colores suaves para cada clase
colores = ["#80cbc4", "#aed581", "#ffcc80"] # verde agua, verde lima, naranja
claro

```

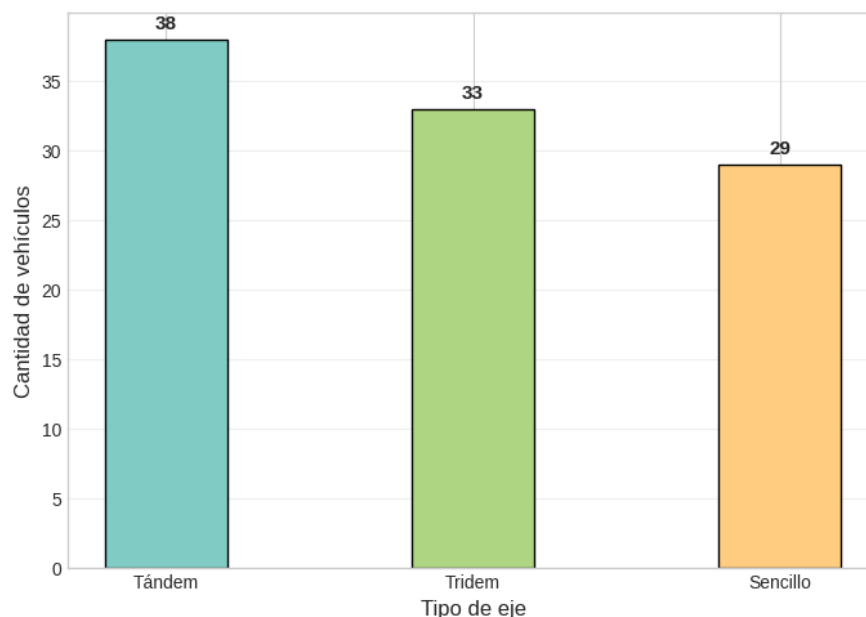
```
# 6. Visualización: Distribución de vehículos por clase
plt.figure(figsize=(7,5))
bars = plt.bar(frecuencias.index, frecuencias.values,
               color=colores, edgecolor="black", width=0.4)

# Etiquetas de cantidad sobre cada barra
for bar in bars:
    yval = bar.get_height()
    plt.text(bar.get_x() + bar.get_width()/2, yval + 0.5, int(yval),
             ha='center', va='bottom', fontsize=11, fontweight='bold')

#plt.title("Distribución de vehículos clasificados por IA", fontsize=14,
#fontweight='bold')
plt.xlabel("Tipo de eje", fontsize=12)
plt.ylabel("Cantidad de vehículos", fontsize=12)
plt.grid(axis="y", alpha=0.3)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Se generó un dataset simulado con variables de tránsito (peso por eje, velocidad y longitud de vehículo) y se entrena un modelo de Random Forest para clasificar automáticamente los vehículos en eje sencillo, tándem o tridem, calcular los ESALs diarios y proyectarlos a 10 años de diseño, siguiendo los criterios de AASHTO 1993 y NEVI 12. A continuación se presentan los siguientes resultados:

Figura 8-4: Distribución de vehículos clasificados por IA



Nota: Muestra la frecuencia de cada tipo de eje (sencillo, tándem y tridem) determinada automáticamente por el modelo, utilizada para calcular ESALs diarios y proyectados a 10 años.

A continuación, se presentan los primeros cinco registros del conjunto de datos generado para el entrenamiento y prueba del modelo de clasificación de tránsito.

Tabla 8-5: Dataset inicial de tránsito (primeros 5 registros)

Peso_ton	Vel_kmh	Long_m	Clase
1.993	41.886	12.988	1
21.211	78.185	5.178	2
17.712	58.861	6.263	2
15.579	70.514	16.580	1
8.496	94.454	12.490	0

Nota: La columna Clase identifica 0 = eje sencillo, 1 = tándem, 2 = tridem.

Se muestra la exactitud obtenida por el modelo de Random Forest al clasificar los tipos de ejes según las variables de peso, velocidad y longitud.

Tabla 8-6: Resultados del modelo de clasificación

Métrica	Valor
Exactitud del modelo	0.95

Tabla 8-7: Reporte de clasificación por clase de eje

Clase	Precision	Recall	F1-score	Soporte
0 (Sencillo)	1.00	1.00	1.00	6
1 (Tándem)	0.86	1.00	0.92	6

2 (Tridem)	1.00	0.88	0.93	8
------------	------	------	------	---

Nota. El modelo alcanza una exactitud del 95 %, suficiente para fines de diseño preliminar y estimación de ESALs.

La siguiente tabla resume el cálculo de ESALs para el tránsito simulado, base para el diseño estructural del pavimento:

Tabla 8-8: ESALs diarios y proyectados a 10 años

Parámetro	Valor Calculado
ESAL diario estimado	409.10
ESAL proyectado a 10 años	1,493,215.00

Nota. Este valor de ESAL proyectado alimenta la metodología AASHTO 1993 y NEVI-12 para determinar el número estructural (SN) y el espesor de cada capa del pavimento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials. <https://doi.org/10.17226/23145>
- Alnaqbi, A. (2024). Machine learning modeling of pavement performance and deterioration. *Astronomical Journal*, 2024(385). (Estudio basado en datos del LTPP para pronóstico de IRI)
- Bryce, J., Boadi, R., & Groeger, J. (2019). Relating Pavement Condition Index and Present Serviceability Rating for Asphalt-Surfaced Pavements. *Transportation Research Record*, 2673(5), 128–136.
- Federal Aviation Administration (FAA). (2016). *Advisory Circular 150/5320-6F: Airport Pavement Design and Evaluation*. U.S. Department of Transportation. https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150_5320_6f.pdf
- Federal Highway Administration (FHWA). (2003). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program*. FHWA-RD-03-031. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/03031.cfm>
- Ghauch, Z. G., & Abou Jaoude, G. (2011). *Strain response of hot mix asphalt overlays for bottom-up reflective cracking*. *arXiv*.
- Guan, S., Liu, H., Pourreza, H. R., & Mahyar, H. (2023). Deep Learning Approaches in Pavement Distress Identification: A Review. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.00828>
- Hernández, J., & Del Val, L. (2013). *A comprehensive overview on main distress mechanisms in composite pavements*. ResearchGate.
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2013). *Aerodrome Design Manual, Part 3: Pavement*. Doc 9157-AN/901.
- Issa, A. (2022). Predicting pavement condition index using artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, 320, 126386.
- Justo-Silva, R., et al. (2021). Review on Machine Learning Techniques for Developing Pavement Performance Predictions. *Sustainability*, 13(9), 5248.
- LTRC. (2022). *Fatigue Behavior of Concrete Pavements under Repetitive Loading*. Louisiana Transportation Research Center.
- Mandal, V., Mussah, A. R., & Adu-Gyamfi, Y. (2020). Deep Learning Frameworks for Pavement Distress Classification: A Comparative Analysis. *arXiv*.
- Mikels, N. (2023). *The Use of Artificial Intelligence in Pavement Engineering* [Technical Report]. Transportation Research Board.

- Monismith, C. L., et al. (1994). *Fatigue of Asphalt Pavements: State of the Art. Transportation Research Record*. TRB.
- Montejo Fonseca, A. (2018). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Tomo I* (3.^a ed.). Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ISBN 978-958-5434-05-2.
- MTOP. (2012). *Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12, Volumen 3: Especificaciones generales para la construcción de caminos*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. <https://www.obraspublicas.gob.ec>
- Piryonessi, S. M., & El-Diraby, T. E. (2020). Data analytics in asset management
- Piryonessi, S. M., & El-Diraby, T. E. (2021). Using Machine Learning to Examine Impact of Type of Performance Indicator on Flexible Pavement Deterioration Modeling. *Journal of Infrastructure Systems*, 27(1), 04021056.
- Qiao, Y., Chen, S., Alinizzi, M., Alamaniotis, M., & Labi, S. (2021). Estimating IRI based on pavement distress type, density, and severity: insights from machine learning techniques. *arXiv*.
- Sandamal, K., Shashiprabha, S., Muttill, N., & Rathnayake, U. (2023). *Pavement Roughness Prediction Using Explainable and Supervised Machine Learning Technique for Long-Term Performance*. *Sustainability*, 15(12), 9617. <https://doi.org/10.3390/su15129617>
- Sidess, A., Ravina, A., & Oged, E. (2020). A model for predicting the deterioration of the international roughness index. *International Journal of Pavement Engineering*. Advance online publication.
- Torres Vila, J. A. (2010). *Diseño de Pavimentos para Carreteras y Aeropuertos*. Editorial Ingeniería Civil.
- Velázquez, A. (2015). *Manual del Asfalto*. Instituto Mexicano del Transporte.
- Yasarer, H., et al. (2024). *Development of Pavement Performance Models for MDOT*. Federal Highway Administration. (Uso de ANN para predicción de IRI, rutting y cracking)