

DISEÑO DE PAVIMENTOS

Un enfoque mecanístico–empírico

VICTOR BELLIDO AEDO

Página de créditos.

© Año, Editorial.

Primera edición: Mes, Año.

ISBN: 000-0-000000-00-0

Depósito legal: 000000000

Impreso en: Ciudad, País.

El presente libro está dedicado a mi familia y amigos que son lo más importante en mi vida, en especial a mi hijo Leonardo de Jesús, que su luz interior siga creciendo hasta resplandecer el mundo.

Agradecimientos

A todos quienes de una u otra manera hicieron posible la concreción de este proyecto académico.

Índice general

Agradecimientos	I
Índice de figuras	X
Índice de cuadros	XI
Lista de siglas y acrónimos	XIV
Preámbulo	XV
Introducción	XVII
1 El pavimento y su historia	1
1.1 El Pavimento	1
1.2 Tipos de pavimentos	2
1.2.1 Pavimentos flexibles	2
1.2.2 Pavimentos rígidos	4
1.2.3 Pavimentos mixtos o compuestos	5
1.3 Historia y evolución del pavimento	7
2 Enfoque Mecánico-Empírico en el diseño de pavimentos	15
2.1 Aspectos generales	15
2.2 Fundamentos Teóricos del Método Mecánico-Empírico . .	17
2.2.1 Comportamiento mecánico de los materiales	17
2.2.2 Respuesta estructural	21
2.2.3 Predicción del Deterioro	23
2.2.4 Criterios de diseño	25
2.2.5 Consideración de variabilidad e incertidumbre . . .	27

2.2.6	Integración del clima y condiciones ambientales . . .	29
2.2.7	Calibración empírica	30
3	Parámetros necesarios para el diseño de pavimentos mediante el método Mecanístico-Empírico	33
3.1	Caracterización de los Materiales para el Diseño de Pavimentos	34
3.1.1	Caracterización de materiales en pavimentos flexibles	35
3.1.2	Caracterización de materiales en pavimentos rígidos	42
3.1.3	Influencia del clima y condiciones ambientales en la caracterización de los materiales	48
3.1.4	Importancia de la caracterización experimental de los materiales en el diseño mecanístico-empírico de pavimentos	49
3.2	Caracterización del tráfico en el diseño de pavimentos	51
3.2.1	Principios generales	51
3.2.2	Parámetros esenciales para la caracterización del tráfico	52
3.2.3	Modelos de representación de la carga	55
3.2.4	Métodos de obtención de datos	56
3.2.5	Relevancia en el diseño mecanístico-empírico	56
3.2.6	Importancia de una caracterización precisa	56
3.3	Caracterización del clima y medio ambiente en el diseño de pavimentos	57
3.3.1	Importancia del clima en el diseño M-E	57
3.3.2	Variables climáticas fundamentales	58
3.3.3	Modelos empleados en el método M-E	58
3.3.4	Estaciones climáticas y generación de datos	59
3.3.5	Impacto del clima en el desempeño del pavimento .	60
3.3.6	Integración del clima al diseño M-E	60
3.3.7	Relevancia técnica y científica	61
4	principales Métodos de Diseño de pavimentos con el enfoque Mecanístico-Empírico	63

4.1	MEPDG / AASHTOWare Pavement ME Design (Estados Unidos)	64
4.1.1	Fundamentos teóricos y evolución	64
4.1.2	Estructura metodológica	65
4.1.3	Estado de implementación	66
4.1.4	Calibración local y transferencia	67
4.2	El método mecanístico–empírico de diseño de pavimentos del TAC (Canadá)	68
4.2.1	Base teórica	68
4.2.2	Estructura metodológica	69
4.2.3	Particularidades técnicas	70
4.2.4	Estado de implementación	71
4.3	La Guía Austroads para el diseño mecanístico–empírico de pavimentos (Australia y Nueva Zelanda)	73
4.3.1	Base teórica	73
4.3.2	Estructura metodológica	74
4.3.3	Particularidades técnicas	75
4.3.4	Evaluación y Rehabilitación	76
4.3.5	Aplicaciones Prácticas	76
4.3.6	Estado de implementación	76
4.3.7	Comparación con el MEPDG y otros métodos	77
4.4	El método mecanístico–empírico ALIZE–LCPC (Francia)	78
4.4.1	Base teórica	78
4.4.2	Estructura metodológica	79
4.4.3	Particularidades técnicas	80
4.4.4	Estado de implementación	80
4.4.5	Comparación con otros métodos	81
4.5	El método mecanístico–empírico basado en DCP (Sudáfrica)	82
4.5.1	Fundamentos teóricos	82
4.5.2	Metodología	83
4.5.3	Particularidades técnicas	84
4.5.4	Estado de implementación	84
4.5.5	Comparación con otros métodos	85

4.5.6	relevancia internacional	85
4.6	El método de diseño de pavimentos del DMRB (Reino Unido)	87
4.6.1	Base teórica	87
4.6.2	Estructura metodológica	88
4.6.3	Particularidades técnicas	88
4.6.4	Estado de implementación	89
4.6.5	Comparación con otros métodos	89
4.7	MEPDG - China	91
4.7.1	Adopción del enfoque MEPDG	91
4.7.2	Base teórica y metodológica	92
4.7.3	Avances específicos en China	92
4.7.4	Particularidades técnicas	93
4.7.5	Estado de implementación	93
4.7.6	Comparación con otros métodos	94
4.8	MEPDG en Costa Rica	95
4.8.1	Introducción del MEPDG en Costa Rica	96
4.8.2	Base metodológica aplicada	96
4.8.3	Modelos de deterioro y calibración	97
4.8.4	Particularidades técnicas en Costa Rica	97
4.8.5	Estado de implementación	98
4.9	MEPDG - América Latina	99
4.9.1	Adopción y transferencia tecnológica	99
4.9.2	Base metodológica adoptada	100
4.9.3	Avances específicos en países	101
4.9.4	Particularidades técnicas	101
4.9.5	Estado de implementación	102
	Epílogo	103
A	Apéndice	105
A.1	Ensayo de Módulo Dinámico: AASHTO T-342	106
A.1.1	Objeto y campo de aplicación	106
A.1.2	Fundamento del ensayo	106
A.1.3	Equipos requeridos	106

A.1.4	Preparación de las probetas	107
A.1.5	Condiciones de ensayo	107
A.1.6	Criterios de validez	108
A.1.7	Resultados y representación gráfica	108
A.1.8	Aplicaciones en el diseño mecanístico-empírico	108
A.2	Ensayo de Módulo Resiliente de Suelos y Agregados: AASH- TO T 307	109
A.2.1	Objeto y campo de aplicación	109
A.2.2	Fundamento teórico	109
A.2.3	Preparación de la muestra	109
A.2.4	Equipamiento requerido	109
A.2.5	Procedimiento de carga	110
A.2.6	Tabla de secuencias estándar	110
A.2.7	Modelos constitutivos	111
A.2.8	Criterios de validez	111
A.2.9	Aplicaciones	111
A.3	Norma ASTM D1194: Ensayo de capacidad portante de sue- los bajo cargas estáticas	112
A.3.1	Objeto y campo de aplicación	112
A.3.2	Materiales y equipos	112
A.3.3	Procedimiento de ensayo	113
A.3.4	Cálculo de parámetros	113
A.3.5	Resultados e interpretación	114
A.3.6	Aplicación en pavimentos rígidos	114
A.3.7	Limitaciones	115
A.3.8	Relevancia en el enfoque mecanístico-empírico	115
A.4	Modelo de Burmister para Sistemas Multicapa	116
A.4.1	Introducción	116
A.4.2	Supuestos Fundamentales	116
A.4.3	Deflexión para Estructura Bicapa	116
A.4.4	Distribución de Esfuerzos en la Interface	117
A.4.5	Extensión a Tres o Más Capas	117
A.4.6	Aplicación en Diseño M-E	118

A.4.7	Limitaciones	118
A.5	Método de los Elementos Finitos (FEM) aplicado a la Teoría Multicapa	119
A.5.1	Introducción General	119
A.5.2	Fundamentos Matemáticos del FEM	119
A.5.3	Modelado axisimétrico para pavimentos	120
A.5.4	Aplicaciones del FEM en Pavimentos	121
A.5.5	Software que implementa FEM en Pavimentos	122
A.5.6	Consideraciones Numéricas	122
A.5.7	Conclusiones	122
A.6	Teoría de Placas Delgadas	123
A.6.1	Introducción	123
A.6.2	Supuestos Básicos de la Teoría de Kirchhoff-Love	123
A.6.3	Descripción Geométrica y Cinemática	123
A.6.4	Rigidez flexural	123
A.6.5	Ecuación diferencial de equilibrio	124
A.6.6	Momentos flectores y esfuerzos	124
A.6.7	Condiciones de borde	125
A.6.8	Aplicación a pavimentos rígidos (fundación de Winkler)	125
A.6.9	Soluciones Clásicas	125
A.6.10	Limitaciones y Extensiones	126
A.6.11	Conclusión	126
A.7	Modos de deterioro estructural en pavimentos flexibles	127
A.7.1	Fisuración por fatiga de la carpeta asfáltica	127
A.7.2	Deformación permanente (ahuellamiento o rutting)	130
A.7.3	Fisuración térmica transversal por contracción	132
A.7.4	Reflexión de fisuras en recapado (overlays)	135
A.7.5	Daño por humedad y pérdida de adhesión (stripping)	138
A.7.6	Interacciones entre mecanismos	140
A.8	Modos de deterioro estructural en pavimentos rígidos	144
A.8.1	Fatiga de la losa de concreto	144
A.8.2	Falla en juntas	146

A.8.3	Punzonamientos en losas continuas con refuerzo . . .	148
A.8.4	Deformaciones por gradientes térmicos e higroscópicos	151
A.8.5	Abultamientos por expansión térmica y cierre de juntas	153
A.8.6	Interacciones entre mecanismos de deterioro en pavimentos rígidos	155
A.9	Criterios de diseño de pavimentos flexibles bajo el enfoque mecanístico-empírico	158
A.9.1	Principales criterios de diseño en pavimentos flexibles	158
A.9.2	Condiciones de desempeño y confiabilidad	160
A.9.3	Factores que condicionan los criterios de diseño . . .	161
A.9.4	Implicancias prácticas del enfoque M-E	161
A.10	Criterios de diseño de pavimentos rígidos bajo el enfoque mecanístico-empírico	162
A.10.1	Principales criterios de diseño en pavimentos rígidos	162
A.10.2	Condiciones de desempeño y confiabilidad	165
A.10.3	Implicancias prácticas	165
A.11	Tratamiento probabilístico en el diseño mecanístico-empírico de pavimentos	167
A.11.1	Distribuciones probabilísticas aplicadas al diseño M-E	167
A.11.2	Simulación Monte Carlo y propagación de incertidumbre	169
A.11.3	Beneficios del tratamiento probabilístico	169

Índice de figuras

1.1	<i>Pavimento flexible</i>	2
1.2	<i>Pavimento rígido</i>	4
1.3	<i>Carretera procesional Persa en el templo de Ishtar (700 a 600 a.c.)</i>	8
1.4	<i>Camino transversal del Qhapaq Ñan</i>	9
1.5	<i>Estructura de la calzada Romana</i>	10
1.6	<i>Estructura de calzada propuesta por Pierre Marie Jérôme Trésaguet en 1775</i>	11
1.7	<i>Estructura de calzada propuesta por John Loudon McAdam en 1816-1819.</i>	12
A.1	<i>Modelo de Burmister</i>	117

Índice de cuadros

3.1	Parámetros climáticos requeridos por el método M-E.	61
A.1	Condiciones típicas de frecuencia y temperatura en el ensayo	107
A.2	Secuencias de carga típicas según AASHTO T 307	110
A.3	Comparación FEM vs. Modelos Analíticos	121

Lista de siglas y acrónimos

AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials. XI, XII

CBR California Bearing Ratio (Índice de Soporte Californiano). XI, XII

CRCP Continuously Reinforced Concrete Pavement (Pavimento de concreto continuamente reforzado). XI, XII

DCP Dynamic Cone Penetrometer (Penetrómetro dinámico de cono). XI, XII

DFT Duración del período de diseño (años). XI, XII

EICM Enhanced Integrated Climatic Model (Modelo climático integrado mejorado). XI, XII

ESAL Equivalent Single Axle Load (Eje simple equivalente). XI, XII

HCC Hormigón de cemento (PCC). XI, XII

HMA Hot Mix Asphalt (Mezcla asfáltica en caliente). XI, XII

IRI International Roughness Index (Índice Internacional de Rugosidad). XI,
XII

JPCP Jointed Plain Concrete Pavement (Pavimento de losas de concreto con juntas). XI, XII

LCPC Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Francia). XI, XII

MEPDG Guía de Diseño de Pavimentos Mecánico–Empírico de AASH-
TO (2008). XI, XII

M_r Módulo resiliente. XI, XII

PCC Portland Cement Concrete. XI, XII

TAC Transportation Association of Canada. XI, XII

Preámbulo

El diseño de pavimentos ha evolucionado desde formulaciones esencialmente empíricas hacia marcos mecanístico–empíricos (M–E) capaces de vincular, con base física, las respuestas estructurales del pavimento con funciones de transferencia de daño y criterios de desempeño. Esta obra se inscribe en esa transición, con una doble ambición: consolidar los fundamentos teórico del enfoque M–E y traducirlos en procedimientos aplicables a contextos latinoamericanos de marcada variabilidad climática, de tránsito y de materiales.

Objetivo y alcance. El libro persigue (i) presentar una síntesis rigurosa de las teorías de respuesta (capas elásticas de Burmister, formulaciones de placa y losa, efectos térmicos e higroscópicos) y su articulación con modelos de daño (fatiga en mezcla asfáltica, deformación permanente por capa, agrietamiento térmico, desempeño funcional mediante IRI, y fallas típicas de losas/juntas), y (ii) ofrecer lineamientos operativos para caracterización de materiales ($|E^*|$, M_r , curvas maestro), modelación del tránsito (AADTT, espectros por clase de eje, factores de crecimiento), acoplamiento clima–

pavimento (p. ej., EICM y equivalentes) y calibración local con niveles de confiabilidad explícitos.

Estructura. La obra se organiza en: (1) *Fundamentos*, (2) *Entradas de diseño*, (3) *Modelos de daño y criterios de desempeño*, y (4) *Implementación y calibración regional*. Se incluye una revisión crítica de MEPDG/AASHTO, así como referencias a TAC M-E (Canadá), Austroads (Australia–NZ), ALIZE–LCPC (Francia), DMRB (Reino Unido) y enfoques basados en DCP (Sudáfrica), señalando equivalencias, diferencias y limitaciones.

Convenciones. Se adoptan unidades SI, notación coherente con guías M–E y niveles de entrada 1–3. Cada ecuación se presenta con variables definidas y supuestos explícitos.

Nota metodológica sobre herramientas digitales. La planeación y verificación preliminar del manuscrito se apoyó en software técnico y asistentes de redacción basados en IA como *herramientas instrumentales* (esquematisación, normalización de símbolos y control de consistencia). La validación técnica, el contraste bibliográfico y la responsabilidad intelectual de los contenidos corresponden exclusivamente al autor, en línea con buenas prácticas de transparencia académica.

Público objetivo. Ingenieros civiles, viales, consultores, funcionarios, docentes e investigadores que requieran un marco robusto para dimensionamiento, evaluación y gestión de pavimentos con criterios de desempeño y riesgo.

Introducción

El diseño de pavimentos constituye uno de los pilares fundamentales de la ingeniería vial moderna, dado que de su adecuada concepción dependen la durabilidad, la seguridad y la sostenibilidad de las infraestructuras de transporte. Tradicionalmente, los métodos de dimensionamiento se han sustentado en enfoques empíricos, contruidos a partir de la observación y extrapolación de experiencias previas. Sin embargo, las crecientes exigencias de tránsito, la variabilidad de los materiales disponibles y la necesidad de optimizar recursos bajo criterios de desempeño han impulsado una transición hacia metodologías más robustas y fundamentadas en la mecánica de materiales.

En este contexto surge el método mecanístico-empírico (M-E), el cual combina el rigor analítico de la teoría estructural con la validación experimental y estadística de los modelos empíricos. Este enfoque permite predecir con mayor confiabilidad los mecanismos de deterioro —como la fatiga del asfalto, la deformación permanente, el agrietamiento térmico o el pandeo de losas de concreto— bajo condiciones específicas de tránsito, clima y propiedades de los materiales.

El presente libro aborda de manera exhaustiva los fundamentos, la evolución y la aplicación práctica del diseño mecanístico-empírico de pavimentos. Se inicia con la revisión de los antecedentes históricos y los métodos convencionales que dieron paso a la actual filosofía M-E. Posteriormente, se desarrolla la estructura conceptual y matemática del método mecanístico-empírico para el diseño de pavimentos, y la Guía AASHTO 2008 (MEPDG), como referencia internacional, contrastándola con otras experiencias destacadas: TAC M-E Design en Canadá, Austroads en Oceanía, ALIZE-LCPC en Francia, DMRB en el Reino Unido, el método basado en DCP en Sudáfrica, así como las adaptaciones en China y América Latina.

Asimismo, se analizan los componentes fundamentales del diseño M-E: caracterización de materiales, modelación del tránsito, interacción clima-pavimento, criterios de desempeño y procesos de calibración regional. La obra enfatiza tanto los aspectos teóricos como las particularidades de implementación en países en desarrollo, donde las limitaciones de información y las condiciones ambientales singulares requieren adaptaciones metodológicas rigurosas.

Finalmente, este libro busca constituirse en un referente académico y profesional para ingenieros, investigadores y estudiantes, aportando no solo una síntesis crítica del estado del arte, sino también lineamientos para la investigación futura y la práctica ingenieril en el diseño y gestión de pavimentos sostenibles.

El pavimento y su historia

1.1. El Pavimento

El pavimento es una estructura multicapa diseñada para soportar cargas de tránsito vehicular, resistir condiciones ambientales, ofrecer confort y seguridad a los usuarios, cumpliendo roles estructurales y funcionales dentro de un sistema de transporte eficiente y sostenible.

El propósito principal de un pavimento es proporcionar una superficie funcional para una necesidad específica de transporte terrestre.

La función básica del pavimento es soportar la carga, bajo diferentes condiciones ambientales estacionales, sin deformarse ni agrietarse.

La función estructural de las diferentes capas en el pavimento es distribuir la carga en la superficie y reducir su intensidad con la profundidad, de modo que la presión sobre la subrasante sea mucho menor que la presión sobre la superficie y pueda ser tolerada sin sufrir una deformación excesiva.

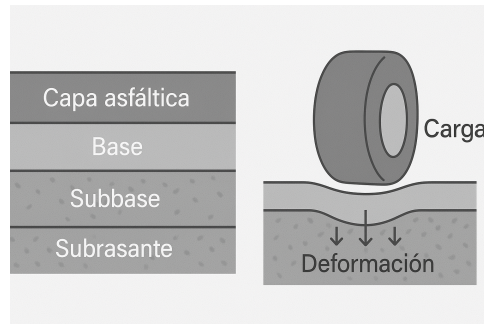
1.2. Tipos de pavimentos

De acuerdo con su comportamiento estructural y funcional, existen tres tipos de pavimentos: pavimentos flexibles, pavimentos rígidos, y pavimentos mixtos o compuestos.

1.2.1. Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles, también conocidos como *pavimentos asfálticos*, se caracterizan por estar compuestos por un sistema estratificado de capas. Estas capas tienen la función de absorber y distribuir gradualmente las cargas vehiculares hacia las capas inferiores, de forma que los esfuerzos transmitidos a la subrasante sean lo suficientemente bajos como para no provocar deformaciones permanentes significativas (Epps, 2019).

Figura 1.1: *Pavimento flexible*



Se denominan *flexibles* porque su estructura es capaz de deformarse ligeramente bajo la acción de las cargas sin agrietarse, sin embargo, como los materiales utilizados no son inherentemente rígidos, es necesario utilizar varias capas para distribuir de forma eficiente las cargas (Heinimann, 2020).

El concepto fundamental aplicado en el diseño de un pavimento flexible considera una estructura estratificada, en la cual los materiales de mayor calidad se sitúan en las capas superiores. Esta disposición permite distribuir las cargas de manera que las tensiones resultantes disminuyan progresivamente hacia las capas inferiores, alcanzando valores suficientemente bajos como

para evitar deformaciones significativas en la subrasante.

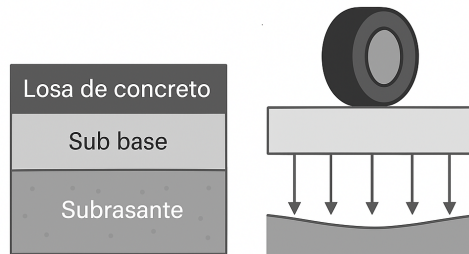
Estructuralmente el pavimento flexible está conformado por la capa inferior denominada *subrasante* que corresponde generalmente al terreno natural existente o modificado, cuyo objetivo es proporcionar un soporte adecuado al conjunto estructural. Sobre la subrasante se dispone la *subbase*, que además de su función estructural, actúa como plataforma de trabajo para la construcción de la base, previniendo a su vez la contaminación de esta última por la migración de materiales finos procedentes de la subrasante. La *base* es la capa intermedia, localizada entre la subbase y la carpeta asfáltica o superficie de rodadura, su función principal es proporcionar capacidad estructural adicional, distribuyendo las cargas inducidas por el tránsito hacia las capas inferiores, de modo que las tensiones transmitidas a estas últimas no excedan su capacidad portante, adicionalmente puede ejercer una función de drenaje. Finalmente, sobre la base se coloca la *capa asfáltica*, que constituye la superficie de rodadura del pavimento y es responsable de recibir directamente las cargas generadas por el tránsito vehicular. Los espesores y las propiedades de cada capa deben seleccionarse cuidadosamente para resistir eficazmente los efectos provocados por las variaciones climáticas, especialmente las fluctuaciones de temperatura y humedad propias de cada estación y ubicación geográfica.

Desde el punto de vista del diseño estructural, los pavimentos flexibles suelen analizarse utilizando la *teoría de capas*, la cual considera el comportamiento elástico de múltiples capas superpuestas sometidas a una carga puntual o distribuida (Haas & Kazmierowski, 1996). Un principio clave en el diseño de estos pavimentos es el uso de *materiales de alta calidad en las capas superiores*, donde los esfuerzos son más intensos, y *materiales de menor calidad en las capas inferiores*, donde las tensiones son menores. Esta estrategia no solo es eficiente estructuralmente, sino que también permite el uso de *materiales locales*, lo cual puede reducir considerablemente los costos, especialmente en regiones donde los materiales de mejor calidad son costosos o escasos (Styer et al., 2024).

1.2.2. Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos, son estructuras formadas principalmente por losas de concreto hidráulico u hormigón de cemento Portland (PCC), caracterizadas por su alta rigidez estructural. Esta rigidez permite que las cargas vehiculares se distribuyan sobre una superficie más amplia, lo cual reduce significativamente las tensiones transmitidas a la subrasante. A diferencia de los pavimentos flexibles, estos sistemas requieren un menor número de capas, aunque cada una debe cumplir funciones específicas y estar cuidadosamente diseñadas.

Figura 1.2: *Pavimento rígido*



Los pavimentos rígidos se desvían muy poco bajo cargas de tráfico, y se comportan de manera diferente a los pavimentos flexibles bajo cargas. La capa de desgaste, que está en contacto con el tráfico, es una losa de concreto de cemento Portland. La losa, debido a su mayor rigidez caracterizada por un módulo elástico, suele distribuir la carga a través de una gran área de pavimento. Esto, a su vez, reduce las tensiones experimentadas por las capas base y subrasante subyacentes. Los pavimentos rígidos pueden o no tener una capa base o subbase, y pueden colocarse directamente sobre la subrasante, sin embargo, en los pavimentos de alto rendimiento, normalmente se incluye una base o subbase. Además de proporcionar una capa de rodadura y una superficie de contacto con el tráfico, la losa proporciona fricción, drenaje, suavidad, control del ruido e impermeabilización de las capas subyacentes.

El análisis estructural de los pavimentos rígidos se basa fundamentalmente en la *teoría de placas*, en lugar de la teoría de capas usada en pavimentos

flexibles.

Constructivamente, los pavimentos rígidos suelen colocarse directamente sobre la subrasante preparada o sobre una sola capa granular o estabilizada, que puede denominarse base o subbase, según su función estructural. Este esquema simplificado resalta aún más su diferencia respecto a los pavimentos flexibles, que requieren múltiples capas de distinta calidad y función estructural (Briceño et al., 2019; Soares et al., 2020).

En términos de desempeño, los pavimentos rígidos tienen una vida útil significativamente mayor, estimada en hasta 30 años, y requieren un mantenimiento mínimo, lo que compensa su mayor inversión inicial. Investigaciones han demostrado que el uso de fibras de refuerzo en el concreto mejora su resistencia a la flexión y reduce el desprendimiento de material, especialmente frente a efectos de fatiga y retracción volumétrica (Briceño et al., 2019).

1.2.3. Pavimentos mixtos o compuestos

Los pavimentos mixtos, también denominados compuestos, consisten en la superposición de una capa superior de mezcla asfáltica en caliente (HMA) sobre una losa inferior de concreto de cemento Portland (PCC). Esta configuración estructural permite combinar las ventajas más destacadas de ambos materiales: la rigidez estructural del PCC con la flexibilidad y confort superficial del HMA.

Desde un punto de vista funcional, el concreto de cemento Portland actúa como la capa estructural primaria, proporcionando una base robusta y duradera capaz de distribuir eficazmente las cargas vehiculares. Por su parte, la capa de asfalto sobrepuesta añade una superficie de rodadura suave, silenciosa y estéticamente agradable, al tiempo que reduce la reflexión de juntas y fisuras del concreto subyacente (Anguas & Correa, 2004).

Este tipo de pavimento presenta un alto costo de construcción inicial, lo que limita su aplicación a proyectos muy específicos, como rehabilitaciones estructurales en corredores de alto volumen o aeropuertos. Su uso como pavimento de nueva construcción es poco común debido a la complejidad técnica y económica del sistema (Fontenele & Fernandes Júnior, 2014).

El diseño estructural de pavimentos mixtos debe considerar principalmen-

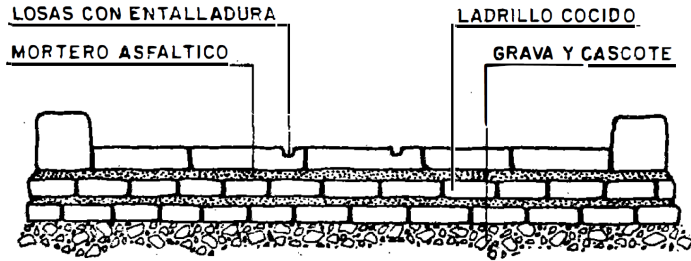
te el comportamiento del concreto, dado que es el componente que absorbe la mayor parte de la carga. En este contexto, se aplica la teoría de placas para modelar las tensiones y deformaciones inducidas por las cargas de tráfico. Este enfoque es esencial cuando la carga de la rueda se encuentra cerca de bordes o juntas del pavimento, donde se concentran mayores tensiones de tracción. Cuando la carga se encuentra en una zona interior de la losa, alejada de los bordes, es posible emplear tanto la teoría de placas como la teoría de capas para modelar el sistema. Esta última es adecuada si se considera una interacción continua entre HMA y PCC, asumiendo una adherencia perfecta entre ambas capas. En estos casos, se puede utilizar una sección equivalente para calcular la tensión de flexión en la losa inferior de concreto (Ávila et al., 2015).

1.3. Historia y evolución del pavimento

Según Zorio (1987), la necesidad de transportar cosechas dio origen a la invención de la rueda hacia el año 3,000 a.C., en una región ubicada entre los mares Negro y Caspio, y el golfo Pérsico, en la parte oriental de la actual Turquía. Esto sugiere que los primeros constructores de caminos se desarrollaron en esa zona del Medio Oriente. La carretera de larga distancia más antigua conocida fue la Carretera Real Persa, construida entre los años 3,500 y 300 a.C., esta vía comenzaba en Susa, cerca del golfo Pérsico, y se extendía hasta Esmirna, abarcando una distancia de 2,957 kilómetros, según Heródoto (475 a.C.), recorrerla tomaba aproximadamente 93 días. En China se desarrollaron las Carreteras Imperiales, contemporáneas a la vía persa, estas eran caminos amplios, bien contruidos y revestidos con piedra, los ríos se cruzaban mediante puentes o transbordadores (ferrys), y los precipicios montañosos eran superados mediante escaleras de peldaños anchos y contrahuellas estrechas, la red alcanzaba unos 3,200 kilómetros y conectaba importantes centros urbanos como Sianfu, Nanking y Cheng-tu, su momento de máximo esplendor fue alrededor del año 200 a.C., cuando su conexión con la red de calzadas romanas dio lugar a la ruta terrestre más larga del mundo: desde Cádiz, en el océano Atlántico, hasta Shangháí, en el océano Pacífico, con una longitud total de 12,800 kilómetros. En la India también existían caminos desde tiempos muy antiguos, hacia el 3,250 a.C., las ciudades de Baluchistán y Punyab contaban con calles pavimentadas, durante el siglo IV a.C., bajo el imperio de Maurya, se construyó la Carretera Real, que se extendía desde el borde del Himalaya, atravesando el Punyab, hasta llegar a la ciudad de Prayag. En Europa, en la isla de Malta, entre los años 2,000 y 1,500 a.C., se construyeron caminos de carril único formados por dos acanaladuras en forma de “V” talladas en la roca arenisca, estos surcos guiaban a carros cuya ruedas encajaban en las ranuras y eran arrastrados por personas. En la isla de Creta, durante la civilización minoica (3,000–1,100 a.C.), también existieron carreteras, siendo la más destacada la que conectaba Gortyna con Knossos.

Para el otro lado del mundo, Portocarrero (2016) señala que, el Qhapaq Ñan fue una extensa red de caminos construida a lo largo de la historia andina, que alcanzó su máximo esplendor en el siglo XV como parte del proceso

Figura 1.3: *Carretera procesional Persa en el templo de Ishtar (700 a 600 a.c.)*



Nota. Adaptado de "Breve historia de las carreteras" (p. 27-38), por V. Zorio, 1987, Revista Obras Públicas, 134.

de expansión del Imperio Inca (Tawantinsuyo). Esta red articulaba seis países de América del Sur y se extendía a lo largo de unos 5,000 kilómetros por la cordillera de los Andes, desde San Juan de Pasto, en el norte de Colombia, hasta Santiago de Chile y Mendoza, en Argentina, en el extremo sur. Se estima que el sistema completo abarcó aproximadamente 40,000 kilómetros de caminos, de los cuales alrededor de 25,000 kilómetros se encontraban en el actual territorio peruano. A pesar de su extensión y complejidad, todos los caminos incaicos convergían en un solo punto central, la ciudad de Cusco capital del imperio, desde allí se proyectaban las principales rutas hacia las cuatro regiones o suyus que conformaban el Tawantinsuyo: Chinchaysuyu (norte), Antisuyu (este), Kuntisuyu (oeste) y Qollasuyu (sur), integrando todo el territorio mediante una planificación vial sofisticada. Según Zorio (1987), el Camino de los Andes es notable, tenía una anchura de aproximadamente 7.5 metros y atravesaba algunas de las montañas más altas de América mediante pendientes suaves trazadas en zigzag. Este camino incluía galerías excavadas en roca sólida, sostenidas por muros de contención que se extendían a lo largo de cientos de metros, lo que permite considerarlo una verdadera carretera prehispánica. Las hondonadas y hendiduras eran rellenas con sólida mampostería, y los valles entre montañas se cruzaban mediante puentes colgantes sostenidos con cuerdas de lana y fibra vegetal. La superficie

de rodadura estaba pavimentada con piedra en la mayor parte del trayecto, y en las zonas más empinadas se construían escalones tallados directamente en la roca. Cabe destacar que esta red vial estaba destinada exclusivamente al tránsito peatonal y al uso de animales de carga nativos, como las llamas, adaptándose así a las condiciones geográficas extremas de los Andes.

Figura 1.4: *Camino transversal del Qhapaq Ñan*

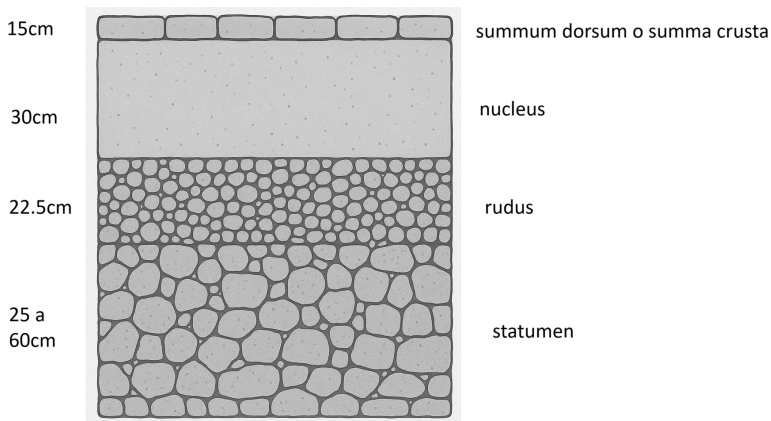


Nota. Adaptado de "Qhapaq Ñan: El Camino Inca y las transformaciones territoriales en los andes peruanos"(p. 21-38), por G. Martínez, 2009, *Ería*, 78-79.

Para Zorio (1987), los romanos fueron los primeros en construir carreteras de manera científica, conocidas comúnmente como calzadas (del latín *calx*, o *calcis*, o piedra caliza), debido al uso de este material en su estructura. Su técnica constructiva fue altamente elaborada, y el modelo de calzada desarrollado hacia el año 300 a.C. se convirtió en el estándar durante los siguientes 2,000 años. El Imperio Romano necesitó una extensa red vial para conectar las provincias entre sí y con la capital, Roma, la cual se comunicaba con el resto del imperio mediante aproximadamente 85,000 kilómetros de calzadas. Estas se destacaban por su trazo rectilíneo, que evitaba curvas innecesarias y no reparaba en obstáculos naturales como pantanos, lagos, barrancos o montañas. lo que implicó la construcción de numerosas obras de ingeniería, entre las cuales destacan los imponentes puentes romanos, muchos de los cuales aún se conservan. La sección típica de la Vía Apia, considerada una de las

más representativas por su calidad, estaba compuesta por varias capas bien definidas, como se muestra en la figura 1.5. Sobre el terreno natural se colocaba una base de piedras planas llamada *statumen*, con un espesor de entre 25 y 60 centímetros, encima de esta se extendía una capa de *rudus*, una mezcla de detritos de cantera con cal, de unos 22.5 centímetros, que junto con el *statumen* conformaba lo que hoy se denomina la subbase, sobre esta subbase se colocaba el *nucleus*, equivalente a la base actual, con un espesor de aproximadamente 30 centímetros, esta capa consistía en piedra partida aglomerada con cal grasa (cal con bajo contenido de óxido de magnesio), finalmente, la superficie de rodadura estaba compuesta por una capa de enlosado fijada con mortero de cal, conocida como *summum dorsum o summa crusta*, de 15 centímetros de espesor, esta capa podía estar formada por cantos planos ajustados con martillo o bien por losas de piedra labrada. El espesor total de las calzadas romanas oscilaba entre 90 y 150 centímetros, formando una estructura sólida y duradera que ha perdurado como referencia de la ingeniería vial hasta nuestros días.

Figura 1.5: *Estructura de la calzada Romana*



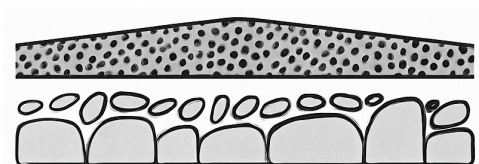
Durante la Edad Media, tras la caída del Imperio Romano en el año 476, el desarrollo de las carreteras sufrió una larga pausa. En esa época, la vida en Europa se caracterizaba por el aislamiento en feudos, y los desplazamientos se realizaban únicamente con fines bélicos o religiosos, generalmente a pie

o a caballo.

Con la llegada de la Edad Moderna, se produjo un resurgimiento en el desarrollo vial. Según Zorio, 1987, en el siglo XIV, en la aldea húngara de Kocs, los fabricantes de carros diseñaron un vehículo de pasajeros conocido como *Kocsi*, en honor a su lugar de origen. Esta palabra dio origen a los términos *coche* en español, *coach* en inglés y *Kutsche* en alemán. Los *Kocsi* eran carros con cajas sujetas a bastidores mediante correas, lo que representó un importante avance en los sistemas de suspensión. Estos vehículos comenzaron a difundirse por Europa durante los siglos XV y XVI.

Francia fue la primera nación en realizar un estudio sistemático sobre la construcción de caminos en tiempos modernos. El documento técnico más antiguo conocido en esta materia es una ordenanza policial de *Julich-Berg*, fechada en 1554, que regulaba la reparación de caminos utilizando piedras y madera disponibles en las cercanías. En el siglo XVIII, se fundó en Francia la Escuela de *Ponts et Chaussées*, la primera escuela de ingeniería del mundo. A partir de entonces, el mantenimiento de las carreteras comenzó a incluirse en el presupuesto del Estado. En 1775, Pierre Marie Jérôme Trésaguet elaboró una memoria en la que codificó un nuevo método de construcción de carreteras. Su propuesta consistía en una estructura por capas: una base de piedras gruesas hincadas a mano, una capa intermedia de fragmentos de piedra para nivelación, y una capa superior de rodadura de tres pulgadas de espesor, compuesta por piedras del tamaño de una nuez, trituradas para formar una superficie dura.

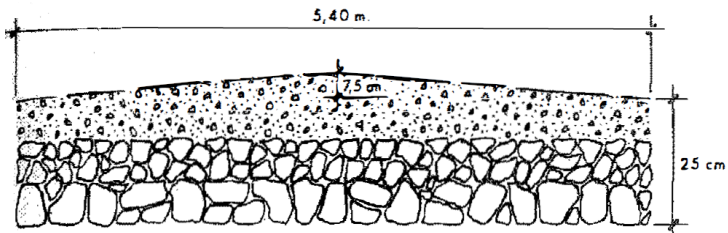
Figura 1.6: Estructura de calzada propuesta por Pierre Marie Jérôme Trésaguet en 1775



Nota. Adaptado de "Breve historia de las carreteras"(p. 27-38), por V. Zorio, 1987, Revista Obras Públicas, 134.

John Loudon McAdam, producto de su trabajo en la construcción de carreteras en Escocia y a sus experimentos, escribió en 1816 *Remarks on the Present System of Road-making* y en 1819 *Practical Essay on the Scientific Repair and Preservation of Roads*, en las cuales recomienda que las carreteras se elevaran sobre el terreno adyacente para facilitar la evacuación de agua, así mismo aconsejó construir las calzadas colocando una capa de grandes rocas sobre las cuales se extendían piedras de menor tamaño, y finalmente se unía la masa total con gravilla fina o escoria (ver figura 1.7); estas recomendaciones fueron adoptadas por el gobierno y en 1827 es nombrado Inspector General de Carreteras de Gran Bretaña. Posteriormente, el uso del *macadam*, denominado así en honor a su propuesta de estructura de pavimento, rápidamente se adoptó en otros países, muy especialmente en Estados Unidos, estableciéndose que para todo tipo de carga, de aquel tiempo, se consideró adecuado un espesor de 25cm de pavimento, estando la capa superficial formada por piedras sueltas de un tamaño máximo de 5cm compactada por la acción del tráfico. (Zorio, 1987)

Figura 1.7: Estructura de calzada propuesta por John Loudon McAdam en 1816-1819.



Nota. Adaptado de "Breve historia de las carreteras" (p. 27-38), por V. Zorio, 1987, Revista Obras Públicas, 134.

Según Tino (2007), la popularidad de la bicicleta, que comenzó en la década de 1880, y la posterior introducción del automóvil una década después, impulsaron la necesidad de construir más y mejores carreteras. Inicialmente, se utilizó alquitrán de hulla, alquitrán vegetal y aceites como aglomerantes

superficiales, y posteriormente como materiales de penetración en los pavimentos de tipo macadam. El primer pavimento de macadam recubierto con alquitrán se colocó en Nottingham (camino de Lincoln) en 1848. El alquitrán, un subproducto del carbón, ya era conocido en el Reino Unido desde principios del siglo XIX, pues se obtenía como residuo del proceso de iluminación mediante gas de carbón. Esta aplicación representa posiblemente uno de los primeros casos documentados de reciclaje de materiales de desecho para usos en pavimentación. Poco después del proyecto de Nottingham, se construyeron pavimentos de macadam con alquitrán en París (1854) y Knoxville, Tennessee (1866). En Washington, en 1871, se utilizó extensivamente un *pavimento de alquitrán* compuesto por rocas asfálticas y asfaltos naturales para la construcción de carreteras.

Hacia 1870, como resultado del desarrollo de la industria petrolera, comenzaron a emplearse betunes de destilación en la fabricación de mezclas bituminosas. Sin embargo, no fue sino hasta finales del siglo XIX cuando el ingeniero norteamericano C. Richardson sentó las bases de la tecnología moderna de pavimentación con mezclas bituminosas.

A partir de la década de 1920, el transporte por carretera experimentó una transformación acelerada a nivel mundial, con un notable incremento del tráfico, especialmente el tráfico pesado. Esto impulsó el desarrollo de nuevos procedimientos de diseño de pavimentos y tecnologías avanzadas en Europa y América para responder a las crecientes demandas del sector. El más reconocido de estos avances fue el *AASHO Road Test*, llevado a cabo en Ottawa, Illinois (EE.UU.), entre 1958 y 1960. Como resultado de este experimento se publicó en 1961 la *AASHO Interim Design Guide*, que compiló los hallazgos del ensayo e introdujo conceptos fundamentales como el nivel de servicio, los ejes equivalentes, entre otros, que han sido adoptados globalmente para el diseño estructural de pavimentos. Además, la guía incluía un método empírico para el cálculo del espesor de capas en función de la intensidad del tráfico pesado. Al respecto, Haas (2006) señala que desde el histórico AASHO Road Test, la Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transporte (AASHO, luego AASHTO) desarrolló una serie de metodologías empíricas fundamentales para el diseño estructural de pavimentos, basadas en datos de servicio y deterioro observados durante el ensayo, siendo estas

los siguientes:

- *Guía AASHO 1961*: Fue la primera formulación empírica basada directamente en los resultados del AASHO Road Test. Su enfoque se centró en la relación entre espesor estructural, número de ejes equivalentes de carga (ESALs) y pérdida de servicio (Índice de Servicio Presente - PSI). El diseño se basaba en curvas de diseño empírico y el concepto de “número estructural” (SN) como parámetro clave.
- *Guía AASHTO 1972 (Interim Guide)*: Introdujo ajustes para condiciones distintas al sitio del ensayo original. Incluyó factores regionales y permitió una mayor flexibilidad en la selección de materiales. Se mejoraron las fórmulas empíricas para adaptarlas a diferentes tipos de pavimentos (flexibles y rígidos).
- *Guía AASHTO 1986*: Supuso una revisión sustancial, incluyendo mayor profundidad en la consideración de subrasantes, materiales de capa base, drenaje y confiabilidad del diseño. Incorporó procedimientos de calibración estadística y permitió el uso de coeficientes estructurales variables según el material.
- *Guía AASHTO 1993*: Esta fue una actualización de la guía de 1986, conservando su estructura empírica pero refinando aún más los parámetros de entrada. Se ajustaron fórmulas para reflejar mejor el desempeño observado y se estandarizó el enfoque para tráfico pesado, incorporando más variables como confiabilidad, desvío estándar y periodo de análisis. Aunque empírico, este método sigue siendo ampliamente usado.

Por último, a finales del siglo pasado e inicios del presente siglo, los enfoques empíricos fueron progresivamente reemplazados por métodos mecanístico-empíricos, que combina principios de ingeniería de materiales con observaciones empíricas. La adopción del *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)* en el nuevo siglo marcó un hito en la profesionalización del diseño, aunque su implementación enfrenta desafíos como la calibración y validación de modelos, representa un avance importante hacia diseños más realistas y eficientes de pavimentos (Haas, 2006).

Enfoque Mecanístico-Empírico en el diseño de pavimentos

2.1. Aspectos generales

El método mecanístico-empírico (M-E) representa una transición epistemológica en la ingeniería de pavimentos desde enfoques empíricos tradicionales, como el AASHTO-1993, hacia procedimientos fundamentados en la mecánica de materiales y la teoría de la respuesta estructural.

A diferencia de los métodos empíricos que correlacionan dimensiones estructurales con datos históricos de tránsito y desempeño, el método M-E explica y predice el comportamiento del pavimento a través de modelos físico-matemáticos, calibrados luego con evidencia empírica para reflejar condiciones locales (clima, materiales, y prácticas constructivas).

El enfoque mecanístico-empírico es actualmente el método más avanzado para el diseño estructural de pavimentos. Combina modelos de la mecánica de materiales mediante la aplicación de leyes físicas (elasticidad, visco-

elasticidad, plasticidad, y fatiga) con validación empírica basada en la calibración y ajuste de modelos mediante datos de campo y tramos experimentales. Este enfoque calcula las respuestas internas del pavimento (esfuerzos, y deformaciones) utilizando modelos mecánicos, y luego vincula estos resultados con modelos empíricos que predicen el deterioro (ahuellamiento, agrietamiento por fatiga, y fisuración térmica) (Mehdawi, 2021).

El diseño mecanístico-empírico representa un avance sustancial sobre los métodos empíricos, permitiendo mayor precisión, adaptabilidad y sostenibilidad. No obstante, su correcta aplicación depende de datos de calidad, calibración adecuada y experiencia técnica, siendo sus principales ventajas las siguientes:

- *Mayor precisión:* Predice tipos específicos de deterioro a lo largo del tiempo bajo condiciones reales. (Jayarathna et al., 2020).
- *Diseño personalizado:* Considera espectros de carga vehicular y datos climáticos específicos del sitio. (Mehdawi, 2021).
- *Uso de nuevos materiales:* Permite incorporar mezclas modificadas y recicladas en los diseños. (Hu et al., 2014).
- *Optimización de costos:* Permite diseños más eficientes y económicos sin sacrificar desempeño. (Nantung, 2010).

Por otro lado, el método M-E presenta las siguientes limitaciones:

- *Alta demanda de datos:* Requiere gran cantidad de información detallada, muchas veces no disponible. (Wang et al., 2008).
- *Necesidad de calibración local:* Los modelos deben ajustarse a condiciones locales para ser efectivos. (Haas, 2006).
- *Curva de aprendizaje:* Su implementación implica capacitación técnica y uso de software especializado. (Li et al., 2011).

2.2. Fundamentos Teóricos del Método Mecánico-Empírico

Los Fundamentos Teóricos del método M-E, para el diseño de pavimentos, se basan en la integración de la mecánica de materiales (fundamentos físicos del comportamiento de los materiales ante cargas) con datos empíricos obtenidos de observaciones y experimentación en campo. Dentro de los principales fundamentos teóricos del método M-E podemos señalar los siguientes:

- Comportamiento mecánico de los materiales conformantes del pavimento.
- Respuesta estructural del pavimento.
- Predicción del deterioro del pavimento.
- Criterios del diseño estructural del pavimento.
- Consideraciones en la variabilidad e incertidumbre.
- Integración del clima y condiciones ambientales.
- Calibración empírica de modelo.

2.2.1. Comportamiento mecánico de los materiales

El núcleo teórico del método M-E radica en la capacidad de representar fielmente el comportamiento de los materiales sometidos a cargas repetidas, considerando su naturaleza elástica (recuperación inmediata al retirar la carga), visco-elástica (recuperación dependiente del tiempo), plástica (deformaciones permanentes) o elasto-plástica. Para su estudio se utilizan modelos constitutivos como la Ley de Hooke para elasticidad, modelos visco-elásticos lineales o no lineales (Maxwell o Kelvin-Voigt), modelos de daño acumulado (fatiga, deformación plástica, e hinchamiento) entre otros.

Capas asfálticas. Las mezclas bituminosas presentan comportamiento visco-elástico dependiente del tiempo de carga, temperatura, frecuencia y se modelan mediante Modelos lineales (Maxwell, Kelvin-Voigt) o por el *módulo dinámico*; que caracteriza la rigidez compleja de una mezcla asfáltica cuando se somete a cargas sinusoidales repetidas, similares a las inducidas por el tránsito vehicular.

Módulo dinámico. Se define como la relación entre la amplitud de la tensión axial y la amplitud de la deformación axial cuando ambas varían en el tiempo:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.1)$$

donde:

$|E^*|$: Módulo dinámico de la mezcla asfáltica [MPa o psi].

σ_0 : Amplitud de la tensión axial aplicada [kPa o psi].

ε_0 : Amplitud de la deformación axial recuperable [adimensional].

Este módulo captura el comportamiento lineal visco-elástico de las mezclas bituminosas, especialmente bajo condiciones de servicio típicas. En materiales visco-elásticos, el módulo no solo depende de la magnitud, sino también del ángulo de desfase entre la tensión y la deformación:

$$E^* = E' + iE'' \quad (2.2)$$

donde:

E^* : Módulo complejo de la mezcla asfáltica (valor complejo).

E' : Módulo de almacenamiento (parte real), representa la energía almacenada durante cada ciclo.

E'' : Módulo de pérdida (parte imaginaria), representa la energía disipada por viscosidad interna.

i : Unidad imaginaria.

El ángulo de fase δ , está definido por:

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (2.3)$$

la magnitud del módulo complejo se obtiene de:

$$|E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2} \quad (2.4)$$

El módulo dinámico $|E^*|$ es una propiedad fundamental en el diseño estructural de pavimentos flexibles, ya que permite modelar el comportamiento visco-elástico de las mezclas asfálticas ante cargas repetidas. Su aplicación

se da en tres aspectos principales:

- *Cálculo de la respuesta estructural*: El valor de $|E^*|$ se utiliza en los modelos multicapa elásticos o visco-elásticos para estimar la deformación horizontal de tracción en la parte inferior de la capa asfáltica, así como las deflexiones superficiales.
- *Predicción de la vida a la fatiga*: El módulo dinámico es un componente clave en las ecuaciones de deterioro por fatiga, las cuales estiman el número de ciclos de carga que una mezcla puede soportar antes de fallar por agrietamiento por tracción.
- *Deformación permanente (ahuellamiento)*: La magnitud del módulo dinámico también influye en la resistencia al ahuellamiento en la zona superior del pavimento. Un módulo bajo a temperaturas elevadas favorece deformaciones plásticas acumuladas en la carpeta. El análisis M-E relaciona $|E^*|$ con la predicción de hendiduras plásticas bajo cargas repetidas.

En síntesis, el módulo dinámico es un parámetro clave que permite capturar de forma precisa el comportamiento dependiente del tiempo y la temperatura de las mezclas asfálticas. Su caracterización adecuada mejora significativamente la confiabilidad del diseño mecanístico-empírico y contribuye a extender la vida útil del pavimento. Para la determinación experimental se utiliza el ensayo de módulo dinámico conforme a la norma AASHTO T342 o ASTM D3497, el cual se desarrolla en el apéndice A.1.

Capas granulares y subrasante. Los suelos granulares (no cohesivos) presentan comportamiento elasto-plástico y se modelan mediante el *Módulo Resiliente (M_r)*, que representa la rigidez efectiva de los materiales no ligados (suelos y capas granulares) bajo cargas dinámicas repetidas, propias del tránsito vehicular.

***Módulo Resiliente (M_r)*.** Se define como la relación entre el esfuerzo desviador aplicado repetidamente y la deformación recuperable correspondiente, es decir, aquella que desaparece al retirar la carga:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2.5)$$

donde:

M_r : Módulo resiliente [MPa o kPa].

σ_d : Esfuerzo desviador aplicado, definido como la diferencia entre el esfuerzo axial y el esfuerzo de confinamiento ($\sigma_1 - \sigma_3$) [kPa].

ε_r : Deformación axial recuperable inducida por carga repetida (adimensional, comúnmente en microdeformaciones $\mu\varepsilon$).

Este parámetro se obtiene en condiciones de carga cíclica, simulando el efecto del tránsito repetido sobre el material.

Modelo generalizado (Witczak-Uzan, 1988.) También llamado modelo universal del M_r , permite una caracterización más realista del comportamiento no lineal, incluyendo efectos combinados de confinamiento y esfuerzo desviador.

$$M_r = k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{p_a} \right)^{k_3} \quad (2.6)$$

donde:

M_r : Módulo resiliente [MPa o kPa].

k_1 : Coeficiente empírico de rigidez inicial.

k_2 : Exponente de dependencia con la presión de confinamiento.

k_3 : Exponente de dependencia con el esfuerzo desviador.

θ : Presión de confinamiento total, como en la ecuación anterior [kPa].

σ_d : Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) [kPa].

p_a : Presión atmosférica de referencia (usualmente 101.3 kPa).

El módulo resiliente (M_r) es un parámetro esencial dentro del método M-E, Su importancia radica en:

- *Cálculo de respuestas estructurales*: El M_r se utiliza como entrada en modelos multicapa elásticos para estimar tensiones verticales en la subrasante, deformaciones elásticas y deflexiones superficiales.
- *Predicción de deformación permanente*: Un menor M_r implica mayor susceptibilidad al *ruteo* o acumulación de deformación, lo cual puede conducir a fallas estructurales prematuras.

La determinación experimental del módulo resiliente se realiza mediante el *ensayo triaxial de carga repetida* conforme a la norma AASHTO T307 o

ASTM D7369, el cual se detalla en el apéndice A.2.

2.2.2. *Respuesta estructural*

La respuesta estructural de un pavimento se refiere al conjunto de tensiones, deformaciones y deflexiones que se desarrollan en sus capas cuando se aplica una carga vehicular. En el contexto del diseño mecanístico-empírico, esta respuesta es el vínculo fundamental entre las propiedades de los materiales, la geometría estructural y el modelo de carga aplicada. Las magnitudes resultantes alimentan los modelos de daño y permiten estimar el deterioro acumulado del sistema frente al tránsito esperado.

Modelo estructural del pavimento flexible. El pavimento flexible se modela como un sistema multicapa elástico lineal con materiales visco-elásticos en algunas capas. Cada capa se caracteriza por:

- Módulo de elasticidad: E [MPa]
- Coeficiente de Poisson: ν
- Espesor: h [cm].

El análisis de los pavimentos flexibles se centra en las tensiones y deformaciones en puntos críticos como:

- La parte inferior de la capa asfáltica (fatiga).
- La parte superior de la subrasante (deformación permanente).

Teoría multicapa elástica. Extiende las soluciones clásicas de la elasticidad para medios homogéneos (solución de Boussinesq) a un medio estratificado compuesto por varias capas horizontales de propiedades distintas. La solución, fue desarrollada inicialmente por Burmister, el cual se detalla en el apéndice A.4.

El modelo de Burmister proporciona una solución analítica robusta para el análisis de la respuesta estructural de pavimentos multicapa sometidos a carga. Su simplicidad relativa y precisión razonable lo convierten en un método ampliamente usado y base para desarrollos computacionales posteriores en el diseño estructural de pavimentos, sin embargo, presenta las siguientes limitaciones:

- No considera visco-elasticidad ni plasticidad de los materiales.
- No representa discontinuidades, bordes libres ni grietas.
- Supone carga circular centrada y simétrica.

Para resolver estas limitaciones, se utilizan modelos más complejos como el método de elementos finitos (FEM) o formulaciones no lineales avanzadas, las cuales detallamos en el apéndice A.5.

Modelo estructural del Pavimento Rígido. El comportamiento estructural de los pavimentos rígidos está dominado por la resistencia a la flexión de la losa de concreto hidráulico. Para su análisis, se recurre al modelo mecánico de una placa elástica delgada sobre fundación elástica continua, donde las cargas vehiculares inducen esfuerzos y deflexiones cuya magnitud y distribución dependen del espesor de la losa, rigidez del concreto y condiciones de soporte.

Teoría de placas delgadas.. Constituye uno de los pilares fundamentales de la mecánica del medio continuo, con aplicación extensa en ingeniería estructural, particularmente en el análisis de losas de concreto como las utilizadas en pavimentos rígidos. Esta teoría permite modelar el comportamiento de elementos bidimensionales de espesor relativamente pequeño sometidos a cargas perpendiculares a su superficie media, describiendo su flexión, deformación y esfuerzos internos. Este modelo se fundamenta en la teoría clásica de placas de Kirchhoff-Love, extendida por Westergaard para casos de carga puntual y condiciones específicas en bordes, las cuales detallamos en el apéndice A.6

Aunque la teoría de placas delgadas es efectiva para placas con relación espesor-longitud pequeña y donde las fuerzas de cortante son despreciables, para losas más gruesas o materiales heterogéneos es necesario:

- Considerar cortante transversal.
- Implementar Modelos de elementos finitos (FEM) para geometrías complejas.
- Implementar Modelos visco-elásticos para comportamiento dependiente del tiempo.

2.2.3. Predicción del Deterioro

La predicción del deterioro se fundamenta en el uso de modelos de transferencia de carga (*load transfer models o transfer functions*), los cuales permiten traducir las respuestas estructurales internas obtenidas mediante el modelo mecánico (tensiones, deformaciones, y deflexiones) en indicadores de daño acumulado o falla estructural en función del tiempo, número de repeticiones de carga, condiciones ambientales, y características del material. Estos modelos constituyen el nexo entre el dominio mecánico y el empírico, y son esenciales para determinar la vida útil del pavimento, seleccionar espesores óptimos, y evaluar el riesgo de fallas prematuras.

Los modelos de transferencia de carga se expresan generalmente como:

$$N_f = f(\text{Respuesta estructural, Propiedades del material, Condiciones de carga}) \quad (2.7)$$

Donde:

N_f : número de repeticiones de carga que una estructura puede soportar antes de que se presente un modo de falla específico.

Respuesta estructural: deformación (ε), tensión (σ), o deflexión (Δ) inducida por una carga aplicada.

Propiedades del material: características mecánicas relevantes del material, como módulo de elasticidad (E), módulo dinámico (E^*), coeficiente de Poisson (ν), entre otros.

Condiciones de carga: magnitud de la carga, tipo de carga (estática o dinámica), distribución del eje, frecuencia de aplicación, etc.

La evolución del daño se evalúa mediante el principio de acumulación

lineal de daño *criterio de Miner*¹, expresado como:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{f,i}} \quad (2.8)$$

Donde:

D : índice de daño acumulado, adimensional. Se considera falla estructural cuando $D \geq 1$.

n_i : número real de aplicaciones de carga del tipo i durante el periodo de análisis.

$N_{f,i}$: número de aplicaciones de carga del tipo i que la estructura puede resistir antes de fallar, según el modelo de transferencia.

n : número total de clases de carga consideradas (por ejemplo, combinaciones de peso por eje, configuración, y volumen).

Modos de deterioro estructural. El método M-E modela el desempeño a partir de respuestas mecánicas (tensiones, deformaciones y deflexiones obtenidas por análisis elástico/multicapa o placa sobre fundación) que, a través de funciones de transferencia calibradas, se transforman en indicadores de daño y predicciones de deterioro. Los deterioros estructurales clave dependen del tipo de sistema (flexible ó rígido), del espectro de cargas (ejes por clase y presión de inflado), del clima (gradientes térmico-hídricos) y de la evolución de las propiedades de materiales (módulo dinámico/resiliente, daño por fatiga, deformación permanente, erosión, etc.).

Pavimentos flexibles Los principales modos de deterioro estructural en pavimentos flexibles se desarrolla en el anexo A.7 y son los siguientes:

- Fisuración por fatiga en la carpeta asfáltica.
- Deformación permanente (ahuellamiento o rutting).
- Fisuración térmica transversal por contracción.

¹El criterio de Miner, propuesto por M. A. Miner en 1945, es una hipótesis lineal de acumulación de daño que establece que un material falla cuando la suma de los daños parciales causados por cada ciclo de carga alcanza un valor crítico, generalmente igual a 1

- Reflexión de fisuras en capas de recapado (*overlays*).
- Daño por humedad y pérdida de adhesión (*stripping*).

Pavimentos rígidos Los principales modos de deterioro estructural en pavimentos rígidos se desarrolla en el anexo A.8 y son los siguientes:

- Fatiga de la losa de concreto.
- Falla en juntas.
- Punzonamientos en losas continuas con refuerzo (*punchouts* en CRCP).
- Deformaciones por gradientes térmicos e higroscópicos (*curling* y *warping*).
- Abultamientos por expansión térmica y cierre de juntas (*blowups*).

2.2.4. Criterios de diseño

Los criterios de diseño estructural se formulan con base en la correlación entre las respuestas mecánicas de la estructura del pavimento ante la aplicación de cargas vehiculares repetidas y el desempeño observado en condiciones reales. Estos criterios permiten definir los límites admisibles de esfuerzos, deformaciones o deflexiones que pueden desarrollarse en las distintas capas del pavimento, sin que se produzcan modos de falla inaceptables durante el período de diseño.

Desde la perspectiva mecanicista, la respuesta de la estructura de pavimento se determina aplicando modelos analíticos o numéricos (multicapa elástico, elementos finitos, etc.) para obtener magnitudes internas como:

ε_t : deformación de tracción en la parte inferior de la capa asfáltica.

ε_z : deformación vertical en la cima de la subrasante.

σ_t : tensión de tracción en la losa de concreto.

Δ : deflexión superficial.

Estas respuestas se comparan con valores límite obtenidos de modelos de transferencia calibrados experimentalmente, lo cual permite estimar la vida útil frente a cada mecanismo de deterioro.

El componente empírico vincula el número de repeticiones de carga que una estructura puede resistir (N_f) con el nivel de deterioro acumulado acep-

table ($D \leq 1$), y con los umbrales de desempeño funcional, tales como:

- Área fisurada (%) en pavimentos flexibles.
- Profundidad del surco (ruteo) en mm.
- Número de losas agrietadas (%) en pavimentos rígidos.
- Índice de condición estructural (SCI) o índice de servicio.

Criterios de diseño en Pavimentos flexibles. Los criterios de diseño de pavimentos flexibles bajo el enfoque mecanístico–empírico integran el análisis estructural de tensiones y deformaciones con modelos de deterioro calibrados empíricamente. El cumplimiento de estos criterios garantiza que el pavimento tenga un desempeño satisfactorio en términos de fatiga, rutting, fisuración térmica, stripping y reflexión de fisuras, dentro de un marco de confiabilidad previamente establecido.

Los Principales criterios de diseño en pavimentos flexibles se detalla en el anexo A.9, siendo estos los siguientes:

- Fatiga de la capa asfáltica
- Deformación permanente (ahuellamiento)
- Fisuración térmica transversal
- Reflexión de fisuras
- Daño por humedad y stripping

Criterios de diseño en Pavimentos rígidos. Los criterios de diseño de pavimentos rígidos bajo el enfoque mecanístico–empírico integran la fatiga de la losa, erosión y pérdida de soporte, falla en juntas, curling/warping, punzonamiento y blow-ups, con límites de desempeño establecidos. La combinación de análisis estructural, climático e hidráulico, junto con modelos empíricos calibrados, permite diseñar pavimentos rígidos más eficientes, duraderos y ajustados a condiciones reales de operación.

Los Principales criterios de diseño en pavimentos rígidos se detalla en el anexo A.10, siendo estos los siguientes:

- Fatiga de la losa de concreto.
- Erosión y pérdida de soporte.
- Falla en juntas (*faulting* y *pumping*)
- Curling y warping

- Punzonamiento
- Abultamientos por expansión térmica (*blow-ups*)

Criterios funcionales complementarios. Además de los criterios estructurales, señalados anteriormente, el diseño puede incorporar parámetros de condición superficial y confort del usuario tales como:

- *IRI (International Roughness Index)*: valor límite al final del período de diseño.
- *Profundidad del surco (rutting)*: menores a 12.5 mm (en muchos casos).
- *Fricción superficial y macrotextura*: para seguridad vial.

2.2.5. Consideración de variabilidad e incertidumbre

El método M-E incorpora de forma explícita la variabilidad inherente en los procesos constructivos, las condiciones de tráfico, el comportamiento de los materiales y el entorno ambiental, mediante el uso de un enfoque probabilístico del diseño. Esta consideración permite evaluar la confiabilidad del pavimento frente a los distintos modos de falla, evitando la suposición determinista que puede subestimar o sobrestimar el desempeño real de la estructura.

Fuentes de variabilidad. Las principales fuentes de incertidumbre en el diseño de pavimentos pueden clasificarse en:

- **Tráfico:** volumen futuro de cargas equivalentes, crecimiento del tráfico, distribución por ejes, pesos reales de los vehículos.
- **Materiales:** variación del módulo resiliente (M_R), módulo dinámico (E^*), espesor de capas compactadas, contenido de humedad, comportamiento viscoelástico o plástico.
- **Condiciones climáticas:** amplitudes térmicas, precipitación, infiltración de agua, ciclos de congelamiento-deshielo.
- **Respuesta estructural:** dispersión en los resultados de modelos multicapa, parámetros del modelo de transferencia calibrados experimentalmente.

- **Construcción y ejecución:** tolerancias en espesores, calidad de compactación, errores en control de materiales, asentamientos diferenciales.

Tratamiento probabilístico. El tratamiento de esta variabilidad se realiza mediante la asignación de distribuciones de probabilidad a las variables de entrada y al uso de análisis estadístico para la evaluación del desempeño esperado. Generalmente, se utiliza:

- Distribución normal o log-normal para módulos, espesor y resistencia.
- Distribución de Weibull o Poisson para el tráfico.
- Análisis de Monte Carlo o simulaciones para propagación de incertidumbre.

El objetivo es estimar la probabilidad de que el pavimento falle bajo cierto modo estructural, y con ello definir un *nivel de confiabilidad estructural* apropiado, para mayor detalle ver anexo A.11

Confiabilidad y margen de seguridad. La confiabilidad estructural (R) se define como la probabilidad de que el pavimento no falle durante el periodo de diseño frente a un modo de falla específico:

$$R = P(D \leq 1) \quad (2.9)$$

Donde:

D : índice de daño acumulado (variable aleatoria).

P : probabilidad de cumplimiento del criterio de diseño.

El diseñador especifica un nivel deseado de confiabilidad, dependiendo de la categoría funcional de la vía y la severidad del modo de falla.

Factores de confiabilidad. El método M-E implementa la confiabilidad mediante la aplicación de *factores de confiabilidad* (Z_R), que ajustan los resultados deterministas para garantizar que el diseño final cumpla con la confiabilidad deseada:

$$Z_R = \frac{X - \mu_D}{\sigma_D} \quad (2.10)$$

Donde:

X : valor objetivo de desempeño.

μ_D : valor medio del daño estimado.

σ_D : desviación estándar del daño.

El factor Z_R se toma de la distribución normal estándar para una confiabilidad específica. Por ejemplo:

$Z_R = 1.645$: para $R = 95 \%$,

$Z_R = 1.282$: para $R = 90 \%$,

$Z_R = 1.036$: para $R = 85 \%$.

La consideración explícita de incertidumbre permite:

- Diseños más robustos y ajustados al riesgo.
- Optimización del espesor y selección de materiales según nivel de confiabilidad.
- Evaluación comparativa de distintas alternativas bajo escenarios variables.
- Planificación de mantenimiento basada en riesgo.

Finalmente, la inclusión de la variabilidad e incertidumbre es uno de los aportes más significativos del método mecanicista-empírico moderno. Esto representa un cambio conceptual fundamental respecto al enfoque tradicional determinista, promoviendo diseños más seguros, eficientes y ajustados a las condiciones reales de operación.

2.2.6. Integración del clima y condiciones ambientales

El desempeño de un pavimento está fuertemente condicionado por el clima y el ambiente, los cuales influyen en las propiedades mecánicas de los materiales, la generación de esfuerzos internos y la progresión de deterioros. Factores como temperatura, humedad, precipitación, radiación solar y ciclos de congelamiento–deshielo actúan de manera simultánea con el tránsito, afectando tanto a pavimentos flexibles como rígidos.

El método M-E reconoce que el clima y las condiciones ambientales tienen una influencia determinante en el comportamiento estructural y funcional de los pavimentos a lo largo del tiempo. Factores como la temperatura, la

humedad, las precipitaciones y el régimen de congelamiento-deshielo modifican de forma significativa las propiedades de los materiales, los estados de esfuerzos y deformaciones, así como la velocidad de deterioro de las capas estructurales.

Importancia del clima en el desempeño del pavimento. Las condiciones climáticas afectan el desempeño del pavimento mediante los siguientes mecanismos:

- **Variación térmica de módulos:** las capas asfálticas son sensibles a la temperatura, disminuyendo su rigidez con el calor y aumentando su rigidez (y fragilidad) en condiciones frías.
- **Humedad y succión en la subrasante:** los cambios en el contenido de humedad del suelo alteran significativamente su módulo resiliente y su capacidad portante.
- **Congelamiento y deshielo:** en zonas frías, la presencia de ciclos de congelamiento genera expansiones, agrietamientos y pérdida de soporte estructural.
- **Infiltración de agua:** incrementa el potencial de bombeo y erosión de la base y subbase, especialmente en pavimentos rígidos.
- **Radiación solar y envejecimiento:** La radiación UV acelera el envejecimiento oxidativo del ligante asfáltico, aumentando la rigidez y reduciendo la ductilidad, lo cual incrementa la susceptibilidad a la fisuración.

2.2.7. Calibración empírica

La calibración empírica es un componente esencial del método M-E, cuya finalidad es ajustar los modelos de transferencia de carga y de predicción de deterioro a las condiciones reales observadas en campo. Este proceso garantiza que los resultados de los modelos mecanicistas no solo representen adecuadamente la física estructural del pavimento, sino que además reflejen con precisión su desempeño observado en determinadas condiciones de carga, materiales, clima, construcción y conservación.

Fundamento de la calibración. El método M-E emplea modelos mecanicistas para calcular las respuestas estructurales críticas, y luego utiliza relaciones empíricas para predecir el número de repeticiones de carga hasta alcanzar un nivel de deterioro definido. Estas relaciones contienen coeficientes y exponentes que deben ser calibrados estadísticamente a partir de datos experimentales.

Niveles de calibración. La calibración puede realizarse en distintos niveles:

- **Calibración global:** aplica a toda una región o país; por ejemplo, los parámetros del MEPDG se calibraron usando bases de datos LTPP (Long-Term Pavement Performance) en EE.UU.
- **Calibración regional:** ajusta los modelos a las condiciones típicas de una zona climática o geotécnica específica dentro de un país.
- **Calibración local:** realizada por una agencia o laboratorio para representar condiciones específicas de materiales, clima y tráfico de un proyecto o jurisdicción.

Requisitos para la calibración. Una calibración empírica robusta requiere los siguientes elementos:

1. **Base de datos confiable:** que incluya información detallada sobre la estructura del pavimento, tráfico, clima, materiales, construcción y desempeño observado.
2. **Modelo mecanicista válido:** que calcule con precisión la respuesta estructural.
3. **Datos de desempeño a largo plazo:** medidas de deterioro en campo (fisuramiento, ruteo, deflexiones, IRI, etc.) en tramos monitoreados durante varios años.
4. **Métodos estadísticos apropiados:** regresión multivariable, análisis de residuos, validación cruzada, etc.

Fuentes de datos para calibración. Entre las principales fuentes de datos utilizadas para la calibración empírica destacan:

- **Programas de monitoreo:** como el LTPP (EE.UU.)
- **Tramos de prueba acelerados:** con estaciones de carga controlada

(HVS – Heavy Vehicle Simulator).

- **Ensayos de laboratorio:** especialmente para obtener curvas de fatiga, deformación permanente, tracción térmica, entre otros.
- **Bases de datos de gestión vial:** registros históricos de mantenimiento, fallas estructurales, rehabilitaciones.

Procedimiento de calibración. El procedimiento estándar para la calibración empírica se compone de:

- Seleccionar tramos representativos con datos completos.
- Calcular las respuestas estructurales críticas usando modelos M-E.
- Estimar el daño acumulado usando valores preliminares de los parámetros.
- Comparar los valores predichos con los valores observados de deterioro.
- Ajustar los coeficientes de los modelos para minimizar el error mediante técnicas de regresión.
- Validar los modelos calibrados con tramos no incluidos en la calibración.

Finalmente, la calibración empírica es el puente fundamental entre la teoría y la práctica del diseño de pavimentos. Sin ella, los resultados del análisis mecanicista pueden desviarse significativamente del desempeño real. Una calibración adecuada, especialmente a nivel local, permite diseñar pavimentos más duraderos, seguros y rentables, alineados con las condiciones específicas de cada proyecto.

Parámetros necesarios para el diseño de pavimentos mediante el método Mecanístico-Empírico

El diseño de pavimentos basado en el método M-E requiere una caracterización detallada y cuantitativa de las condiciones estructurales, funcionales y ambientales que determinan la respuesta del sistema vial en servicio. En este sentido el método M-E demanda la introducción de datos precisos que describan, modelen y permitan predecir el comportamiento del pavimento bajo cargas variables, condiciones climáticas cambiantes y propiedades dinámicas del material.

3.1. Caracterización de los Materiales para el Diseño de Pavimentos

El diseño de pavimentos mediante el enfoque M-E se fundamenta en la interacción entre modelos físicos que describen la respuesta estructural del pavimento ante cargas aplicadas y modelos empíricos que relacionan dicha respuesta con el deterioro observado en campo. Dentro de este esquema, los materiales desempeñan un rol central, pues sus propiedades mecánicas y físicas definen el comportamiento estructural de cada una de las capas que componen el sistema de pavimento.

Los materiales utilizados en la construcción de pavimentos se clasifican funcionalmente de acuerdo con su ubicación dentro de la estructura y su contribución al soporte de cargas:

- *Capa de rodadura*: Conformada por mezclas asfálticas o concretos hidráulicos, está directamente expuesta al tráfico vehicular y a las condiciones ambientales. Debe resistir el desgaste superficial y proporcionar una superficie segura y cómoda.
- *Capa base*: Constituida por materiales granulares o estabilizados, transmite y reduce las tensiones hacia las capas inferiores. Su adecuada rigidez y durabilidad son fundamentales para la integridad del pavimento.
- *Capa sub-base*: Ubicada entre la base y la subrasante, su función es complementar la distribución de cargas y contribuir al drenaje estructural.
- *Subrasante*: Corresponde al suelo natural o mejorado que sirve de apoyo a toda la estructura. Su comportamiento mecánico es determinante en el desempeño global del pavimento.

Los modelos mecanísticos requieren parámetros específicos que describen el comportamiento de los materiales bajo condiciones de carga repetida, humedad, temperatura, envejecimiento y otras variables ambientales. Esta caracterización no es uniforme, sino que depende del tipo de estructura (flexible o rígida) y del nivel de confiabilidad del diseño.

3.1.1. Caracterización de materiales en pavimentos flexibles

El diseño de pavimentos flexibles requiere la caracterización mecánica y físico-química de los siguientes materiales:

Mezclas asfálticas. La capa de rodadura y, en ocasiones, capas intermedias o de base, están compuestas por mezclas asfálticas. La caracterización adecuada de las mezclas asfálticas constituye un elemento central en el diseño de pavimentos flexibles bajo el enfoque mecanístico-empírico. A diferencia del método empírico tradicional, que se basa en correlaciones simplificadas y factores globales de equivalencia, el enfoque ME incorpora propiedades fundamentales del material, modeladas en función del tiempo, la temperatura y el nivel de carga, de manera que el comportamiento estructural y funcional del pavimento pueda predecirse mediante modelos constitutivos más cercanos a la realidad.

En el método M-E, la mezcla asfáltica se caracteriza principalmente mediante las siguientes propiedades mecánicas y volumétricas:

- *Módulo dinámico (E^*):* Representa la rigidez compleja de la mezcla frente a cargas cíclicas, en función de la temperatura y la frecuencia de carga. Determinado mediante el ensayo de carga cíclica AASHTO T-342 o ASTM D3497 descrita en el apéndice A.1. Es fundamental para el análisis mecanístico porque permite modelar la respuesta viscoelástica lineal. Está función de la temperatura y la frecuencia, por lo que se construye una curva maestra de E^* para las condiciones proyectadas de operación.
- *Ángulo de fase (φ):* Define la relación entre la tensión y la deformación en el comportamiento viscoelástico. Valores cercanos a 0 reflejan un comportamiento elástico dominante, mientras que valores hacia 90 indican respuesta viscosa.
- *Relación de Poisson (ν):* Generalmente asumida entre 0.30–0.40, puede determinarse experimentalmente o adoptar valores estándar según tipo de mezcla.
- *Propiedades volumétricas:* Contenido de vacíos, vacíos llenos de asfalto (VFA), contenido de ligante, densidad máxima teórica, densidad

compactada. Estas propiedades se obtienen mediante métodos Superpave o Marshall. Estos parámetros condicionan la durabilidad y la susceptibilidad al daño por humedad.

- *Resistencia a la fatiga*: Se evalúa mediante ensayos de flexión o tracción directa bajo cargas repetidas (ASTM D7460). La relación deformación-número de ciclos hasta falla se ajusta mediante modelos tipo Ley de Miner o curvas de fatiga específicas. Parámetros calibrados (k_1, k_2, k_3) para modelos de vida a fatiga. Pueden obtenerse por ensayo directo o adoptarse de la literatura para condiciones similares.
- *Deformación permanente*: Curvas de acumulación de deformación (rutting) mediante ensayos triaxiales repetidos o de rueda cargada (APA, Hamburg, entre otros). Generalmente caracterizada mediante el ensayo de pista de rueda (Hamburg Wheel-Tracking Test, AASHTO T324)
- *Susceptibilidad a la humedad (stripping)*: Evaluada mediante el ensayo de tracción indirecta con acondicionamiento por humedad (AASHTO T283).
- *Coefficientes térmicos y de contracción*: Importantes para modelar el agrietamiento térmico y la interacción mezcla-ambiente.

Modelos constitutivos La caracterización se incorpora en el método M-E a través de modelos viscoelásticos y de daño acumulativo:

Modelo generalizado de Maxwell: El módulo dinámico en función de la frecuencia y la temperatura se expresa mediante el principio de superposición tiempo-temperatura (TTSP):

$$E^*(\omega, T) = E(\omega \cdot a_T) \quad (3.1)$$

donde:

E^* : módulo dinámico complejo,

ω : frecuencia angular,

a_T : factor de desplazamiento por temperatura.

Modelo de fatiga: El número de ciclos hasta la falla (N_f) se estima en

función de la deformación de tracción y el módulo dinámico:

$$N_f = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \left(\frac{1}{|E^*|} \right)^{k_3} \quad (3.2)$$

donde:

N_f : número de repeticiones hasta la falla por fatiga.

ε_t : deformación unitaria de tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica.

$|E^*|$: módulo dinámico (magnitud) de la mezcla asfáltica.

k_1, k_2, k_3 : parámetros de calibración (local/global) del modelo de fatiga.

Curva maestra sigmoideal del módulo dinámico

$$\log_{10}(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp[\beta + \gamma \log_{10}(f_r)]} \quad (3.3)$$

donde:

$|E^*|$: módulo dinámico (MPa) de la mezcla asfáltica.

f_r : frecuencia reducida $f_r = f \cdot a_T$ (TTSP).

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: parámetros de ajuste de la sigmoide (identificados por regresión).

a_T : factor de corrimiento por temperatura (p. ej., WLF u Arrhenius).

Niveles de entrada de datos El método M-E reconoce tres niveles de precisión para la caracterización de mezclas:

- *Nivel 1*: datos de laboratorio (ensayos de módulo dinámico, fatiga, pista de rueda).
- *Nivel 2*: correlaciones empíricas basadas en granulometría, propiedades del ligante y parámetros volumétricos.
- *Nivel 3*: valores por defecto de la base de datos.

Relevancia en el diseño ME La caracterización detallada de las mezclas asfálticas permite:

- Modelar el comportamiento viscoelástico dependiente de frecuencia y temperatura.
- Predecir modos de falla como fatiga, deformaciones permanentes y agrietamiento térmico.
- Integrar la respuesta del material con el tráfico, clima y estructura en modelos de desempeño a lo largo de la vida de servicio.

Materiales granulares (base y sub-base). La caracterización de los materiales granulares (base y subbase) constituye un aspecto esencial en el diseño mecanístico-empírico, dado que estas capas cumplen funciones críticas en la transmisión de cargas, el control de deformaciones permanentes y el desempeño hidráulico del sistema. A diferencia de los métodos empíricos tradicionales, el método M-E incorpora parámetros fundamentales que representan el comportamiento no lineal y dependiente de las condiciones de confinamiento, humedad y carga repetida.

Las principales propiedades de los materiales granulares en el método M-E son:

- *Módulo resiliente (M_r):* rigidez elástica recuperable bajo cargas repetidas, determinada mediante ensayos triaxiales cíclicos (AASHTO T307), para mayor detalle ver apéndice A.2.
- *Coefficiente de Poisson efectivo (ν):* relación entre deformaciones laterales y longitudinales.
- *Resistencia al corte:* definida por cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ), según el criterio de Mohr–Coulomb.
- *Susceptibilidad a deformaciones permanentes:* expresada mediante modelos de acumulación plástica bajo cargas repetidas.
- *Propiedades hidráulicas:* coeficiente de permeabilidad y succión capilar, fundamentales en el deterioro inducido por humedad.
- *Propiedades volumétricas:* densidad máxima seca, humedad óptima, porcentaje de finos (AASHTO T99/T180).

Modelos constitutivos El método M-E utiliza modelos no lineales para representar el comportamiento de los materiales granulares:

Modelo de módulo resiliente triaxial

$$M_r = k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{p_a} \right)^{k_3} \quad (3.4)$$

donde:

M_r : módulo resiliente.

k_1, k_2, k_3 : parámetros de calibración del material.

θ : esfuerzo volumétrico ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$).

σ_d : esfuerzo desviador ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$).

p_a : presión atmosférica de referencia.

Modelo hiperbólico alternativo

$$M_r = \frac{A \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)}{1 + B \left(\frac{\sigma_d}{p_a} \right)} \quad (3.5)$$

donde:

M_r : módulo resiliente.

A, B : constantes del material (regresión sobre triaxiales cíclicos).

σ_3 : presión confinante.

σ_d : esfuerzo desviador.

p_a : presión atmosférica de referencia.

Modelo de deformación plástica acumulada

$$\varepsilon_p = \alpha \cdot N^\beta \quad (3.6)$$

donde:

ε_p : deformación plástica acumulada.

N : número de repeticiones de carga.

α, β : parámetros de calibración dependientes del material y la humedad.

Niveles de entrada de datos El método M-E establece tres niveles de entrada para los materiales granulares:

- *Nivel 1 (avanzado)*: caracterización experimental completa mediante ensayos triaxiales y parámetros calibrados.
- *Nivel 2 (intermedio)*: estimación indirecta de M_r a partir de correlaciones con CBR, R-value u otros ensayos.
- *Nivel 3 (básico)*: uso de valores por defecto proporcionados según la clasificación SUCS o AASHTO M145.

Relevancia en el diseño mecanístico-empírico La adecuada caracterización de los materiales granulares permite:

- Representar el comportamiento no lineal dependiente del estado de esfuerzos.
- Predecir deformaciones permanentes en capas no ligadas.
- Considerar los efectos del agua y el drenaje en la vida útil del pavimento.
- Ajustar la precisión del modelo según la calidad de la información disponible.

Subrasante. La subrasante constituye la fundación del sistema de pavimento flexible y su caracterización adecuada es determinante para la confiabilidad del diseño estructural. En el enfoque mecanístico-empírico, la subrasante deja de representarse como una capa de rigidez constante y se modela

mediante parámetros fundamentales que describen su comportamiento no lineal, dependiente de la humedad, la temperatura y el estado de esfuerzos.

Las propiedades más relevantes son:

- *Módulo resiliente (M_r)*: parámetro central que define la rigidez elástica recuperable de la subrasante bajo cargas repetidas (AASHTO T307) desarrollado en el apéndice A.2.
- *Resistencia al corte*: caracterizada por la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ), bajo el criterio de Mohr–Coulomb.
- *Relación de Poisson (ν)*: indica la redistribución de esfuerzos laterales y longitudinales bajo carga.
- *Susceptibilidad a la humedad*: el contenido de agua y el grado de saturación alteran significativamente el M_r ; el método M-E considera su variación estacional.
- *Propiedades volumétricas y de compactación*: densidad máxima seca, humedad óptima, índice de plasticidad (IP), límites de Atterberg.
- *Congelamiento-descongelamiento*: En regiones frías, se deben determinar parámetros de congelación del suelo y susceptibilidad a la formación de escarcha.

Modelos constitutivos *Modelo triaxial generalizado*

$$M_r = k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{p_a} \right)^{k_3} \quad (3.7)$$

donde:

M_r : módulo resiliente de la subrasante.

k_1, k_2, k_3 : parámetros de calibración (AASHTO T307).

θ : esfuerzo volumétrico ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$).

σ_d : esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$).

p_a : presión atmosférica de referencia.

Modelo estacional de rigidez

$$M_{r,estacional} = f_{clima}(T, h) \cdot M_{r,ref} \quad (3.8)$$

donde:

$M_{r,estacional}$: módulo resiliente ajustado por estación.

$M_{r,ref}$: módulo resiliente en condición estándar de laboratorio.

$f_{clima}(T, h)$: factor climático en función de temperatura (T) y humedad (h).

Niveles de entrada de datos El método M-E establece tres niveles jerárquicos de caracterización:

- *Nivel 1 (avanzado)*: obtención experimental de M_r mediante ensayos triaxiales dinámicos y calibración estacional.
- *Nivel 2 (intermedio)*: estimación de M_r a partir de correlaciones con CBR, R-value o parámetros geotécnicos como IP y LL.
- *Nivel 3 (básico)*: uso de valores por defecto en función de la clasificación SUCS o AASHTO M145.

Relevancia en el diseño mecanístico-empírico La adecuada caracterización de la subrasante permite:

- Considerar la variación estacional de la capacidad de soporte en el análisis estructural.
- Representar el comportamiento no lineal y dependiente de la humedad.
- Integrar el efecto de las condiciones climáticas (precipitación, nivel freático, succión capilar) en las predicciones de desempeño.
- Mejorar la confiabilidad y reducir la incertidumbre del diseño frente a métodos empíricos tradicionales.

3.1.2. Caracterización de materiales en pavimentos rígidos

En pavimentos de concreto, el comportamiento de la losa, su interacción con la subrasante, y su durabilidad a lo largo del tiempo requieren una caracterización distinta a la del pavimento flexible.

Caracterización del concreto de cemento Portland en pavimentos rígidos. El desempeño de un pavimento rígido depende directamente de las propiedades mecánicas, térmicas e higroscópicas del concreto de cemento Portland (PCC). Bajo el enfoque mecanístico-empírico, el PCC no se representa como un material elástico lineal ideal, sino como un medio dependiente de la resistencia, del tiempo, de la temperatura y de la humedad.

Las propiedades fundamentales del PCC para el diseño mecanístico-empírico incluyen:

- Módulo de elasticidad (E), dependiente de la resistencia a la compresión y del tipo de agregado. Determinado por ensayo según ASTM C469. Representa la rigidez inicial del concreto.
- Resistencia a la tracción por flexión o módulo de rotura (MOR). Determinada mediante ensayo de viga en tercera parte, conforme a la norma ASTM C78. Es el principal parámetro de diseño estructural.
- Resistencia a la compresión (f'_c), utilizada como control de calidad.
- Coeficiente de Poisson (ν). Comúnmente entre 0.15 y 0.20. Puede adoptarse de tablas normalizadas o determinarse experimentalmente.
- Coeficiente de dilatación térmica lineal (α_t). Se determina por ensayo o se adopta de la bibliografía. Es fundamental para evaluar esfuerzos térmicos en la losa.
- Contracción por secado y fluencia, dependientes del tiempo. Puede inducir agrietamiento temprano. Debe cuantificarse si se modelan juntas o se diseña sin armadura continua.
- Módulo de rotura efectivo a fatiga bajo cargas repetidas.
- Propiedades de durabilidad: permeabilidad, resistencia química, ciclos de congelamiento y deshielo.

Relación entre módulo elástico y resistencia a la compresión

$$E = k \cdot (f'_c)^{1/2} \quad (3.9)$$

donde:

E : módulo de elasticidad del concreto (MPa).

f'_c : resistencia a la compresión (MPa).

k : coeficiente empírico dependiente de la densidad y naturaleza de los agregados.

Modelo de fatiga en flexión

$$\log_{10}(N_f) = Z_1 + Z_2 \left(\frac{\sigma_t}{MOR} \right) + Z_3 \left(\frac{\sigma_t}{MOR} \right)^2 \quad (3.10)$$

donde:

N_f : número de repeticiones hasta la falla por fatiga.

σ_t : esfuerzo de tracción en la fibra inferior de la losa (MPa).

MOR : módulo de rotura o resistencia a flexión (MPa).

Z_1, Z_2, Z_3 : coeficientes de calibración del modelo de fatiga.

Deformaciones por gradientes térmicos e higroscópicos

$$\varepsilon_T = \alpha_t \cdot \Delta T \quad (3.11)$$

donde:

ε_T : deformación unitaria por gradiente térmico.

α_t : coeficiente de dilatación térmica lineal.

ΔT : variación de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

$$\varepsilon_H = \alpha_h \cdot \Delta h \quad (3.12)$$

donde:

ε_H : deformación unitaria por gradiente de humedad.

α_h : coeficiente higroscópico del concreto.

Δh : variación del contenido de humedad relativa.

Modelo de deformación dependiente del tiempo

$$\varepsilon_{total}(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_{sh}(t) + \varepsilon_{cr}(t) \quad (3.13)$$

donde:

$\varepsilon_{total}(t)$: deformación total en el tiempo t .

ε_e : deformación elástica inmediata.

$\varepsilon_{sh}(t)$: deformación por contracción de secado.

$\varepsilon_{cr}(t)$: deformación por fluencia.

Base para pavimento rígido La capa de base debajo de la losa de concreto puede estar compuesta por:

- *Material granular estabilizado*: Se caracteriza por su módulo resiliente, resistencia al bombeo, y uniformidad.
- *Material tratado con cemento o asfalto*: Requiere determinación del módulo efectivo, resistencia a la tracción indirecta, y compatibilidad con la losa.
- *Espesor y tipo de base*: Afectan directamente la capacidad de soporte y el comportamiento frente al bombeo por presión hidráulica inducida por el tráfico.

Niveles de entrada de datos El método M-E establece tres niveles de caracterización de los parámetros del PCC:

- **Nivel 1 (avanzado)**: obtención experimental del módulo de elasticidad, módulo de rotura, coeficientes térmicos e higroscópicos, contracción y fluencia.
- **Nivel 2 (intermedio)**: estimaciones mediante correlaciones, por ejemplo, E a partir de f'_c .
- **Nivel 3 (básico)**: uso de valores por defecto, con calibración regional.

Relevancia en el diseño mecanístico-empírico La caracterización del concreto de cemento Pórtland es esencial porque:

- Permite modelar con realismo el comportamiento estructural frente a cargas repetidas.
- Integra los efectos de gradientes térmicos e higroscópicos en el análisis de curling y warping.
- Incluye la influencia de la contracción y fluencia a lo largo de la vida útil.
- Asegura la predicción del desempeño frente a los modos de falla críticos: agrietamiento por fatiga, escalonamiento y deterioro en juntas.

Subrasante en pavimentos rígidos. La subrasante constituye la base natural sobre la cual descansa la losa de concreto en los pavimentos rígidos. Su caracterización es esencial en el diseño mecanístico-empírico porque, aunque la losa de concreto posee gran rigidez, la respuesta de la subrasante influye directamente en la distribución de esfuerzos, deformaciones y deflexiones que determinan la vida útil del pavimento. La subrasante no se modela mediante su módulo resiliente como en los pavimentos flexibles, sino mediante el coeficiente de reacción de la fundación elástica (k), determinado en placas de carga conforme a la norma ASTM D1194, ver apéndice A.3.

Las propiedades principales de la subrasante en pavimentos rígidos son:

- Módulo de reacción de la subrasante (k).
- Módulo resiliente (M_r).
- Resistencia al corte: cohesión (c) y ángulo de fricción interna (φ).
- Efectos de humedad y estacionalidad.
- Propiedades volumétricas: grado de compactación, densidad máxima seca, índice de plasticidad (IP).

Módulo de reacción de la subrasante

$$k = \frac{q}{\Delta} \quad (3.14)$$

donde:

k : módulo de reacción de la subrasante (MPa/m).

q : presión aplicada sobre la superficie de la losa (MPa).
 Δ : deflexión vertical asociada (m).

Relación entre M_r y k

$$k = \frac{M_r}{r} \quad (3.15)$$

donde:

M_r : módulo resiliente de la subrasante (MPa).
 r : factor geométrico de distribución de carga dependiente del espesor de losa y del radio de rigidez relativo.

Modelo no lineal de M_r

$$M_r = k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{p_a} \right)^{k_3} \quad (3.16)$$

donde:

M_r : módulo resiliente de la subrasante (MPa).
 k_1, k_2, k_3 : parámetros de calibración del material.
 θ : esfuerzo volumétrico ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$).
 σ_d : esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$).
 p_a : presión atmosférica de referencia.

Niveles de entrada de datos

1. **Nivel 1 (avanzado)**: M_r obtenido mediante ensayos triaxiales dinámicos (AASHTO T307) y correlación con k .
2. **Nivel 2 (intermedio)**: estimación indirecta de M_r y k a partir de ensayos CBR o R-value.
3. **Nivel 3 (básico)**: valores por defecto según clasificación SUCS o AASHTO.

Relevancia en el diseño mecanístico-empírico

- El módulo de reacción k se emplea en las ecuaciones de Westergaard para calcular esfuerzos y deflexiones en losas.

- La variación estacional de la subrasante impacta en la predicción del agrietamiento por fatiga y escalonamiento en juntas.
- La relación entre M_r y k permite un modelado más realista que los métodos tradicionales basados en CBR.
- Una correcta caracterización de la subrasante incrementa la confiabilidad del diseño estructural y reduce riesgos de falla prematura.

3.1.3. *Influencia del clima y condiciones ambientales en la caracterización de los materiales*

El desempeño de los pavimentos está fuertemente condicionado por el *clima* y las *condiciones ambientales locales*, los cuales modifican las propiedades mecánicas e hidráulicas de los materiales que componen la estructura. A diferencia de los métodos empíricos, el método M-E incorpora explícitamente modelos climáticos mediante un *Módulo de Análisis Climático (CLM)* que interactúa con los modelos de materiales.

El *Módulo Climático (CLM)* procesa datos horarios de temperatura, humedad, precipitación, radiación, viento y nivel freático. Mediante modelos de transferencia de calor y humedad, calcula mes a mes las propiedades ajustadas de cada material, considerando:

- La variación estacional de rigidez en mezclas asfálticas.
- La reducción del M_r en capas granulares y subrasante por saturación.
- Los efectos de gradientes térmicos e higroscópicos en losas de concreto.

Dentro de los principales factores climáticos relevantes que afectan a los materiales tenemos:

- *Temperatura*: modifica la rigidez de mezclas asfálticas (E^*) y produce gradientes en losas de concreto que generan curling y fisuración.
- *Humedad y precipitación*: alteran el grado de saturación (S_r), reducen el módulo resiliente (M_r) y aumentan la susceptibilidad a deformaciones permanentes.
- *Congelamiento y deshielo*: provocan expansiones volumétricas y pérdida de rigidez tras el deshielo en suelos con finos y agua libre.
- *Viento y radiación solar*: incrementan la evaporación superficial y la

contracción por secado en concretos y suelos finos.

3.1.4. *Importancia de la caracterización experimental de los materiales en el diseño mecanístico-empírico de pavimentos*

El método mecanístico-empírico representa un avance respecto a los métodos empíricos tradicionales al predecir la respuesta estructural del pavimento (tensiones, deformaciones y deflexiones) y relacionarla con los mecanismos de deterioro observados en campo. Para lograr esta predicción, resulta indispensable la *caracterización experimental de los materiales*, que debe reflejar sus propiedades mecánicas, hidráulicas, térmicas y visco-elásticas bajo condiciones realistas de carga y ambiente.

Los principales fundamentos de la caracterización experimental son:

- Garantiza la *representatividad* del comportamiento real de mezclas asfálticas, capas granulares, subrasante y concretos frente a cargas repetidas y condiciones climáticas.
- Suministra datos de entrada a los tres niveles del método M-E:
 - *Nivel 1 (avanzado)*: propiedades medidas en laboratorio o campo.
 - *Nivel 2 (intermedio)*: estimaciones mediante correlaciones empíricas.
 - *Nivel 3 (básico)*: uso de valores por defecto en bases de datos.
- Permite cuantificar la **variabilidad e incertidumbre** mediante distribuciones estadísticas y análisis de confiabilidad.

Los principales Beneficios de la caracterización experimental de los materiales son:

- Mejora la *precisión en la predicción del desempeño*, reduciendo la dependencia de correlaciones empíricas.
- Facilita la *calibración local* del MEPDG, ajustando los modelos globales a condiciones de materiales, clima y tráfico regionales.
- Permite la *optimización de recursos*, evitando sobre-dimensionamientos o fallas prematuras.
- Sirve de base para enfoques de *diseño probabilístico*, evaluando la sensibilidad del diseño frente a variaciones de tráfico, clima y materiales.

En conclusión, la caracterización experimental de materiales constituye un *pilar del diseño mecanístico-empírico*, asegurando diseños confiables, eficientes y adaptados a las condiciones reales de servicio. La calidad de los resultados del diseño M-E depende directamente de la precisión en la caracterización de materiales. Por ello, se recomienda:

- Aplicación de ensayos normalizados.
- Uso de curvas maestras y superficies de respuesta para mezclas asfálticas.
- Evaluación del comportamiento real mediante retrocálculo de módulos in-situ.
- Ajustes y calibraciones locales mediante correlaciones empíricas regionales

Una caracterización deficiente puede conducir a errores sustanciales en la predicción del desempeño del pavimento, afectando su confiabilidad, durabilidad y economía.

Finalmente, el diseño M-E exige una caracterización detallada y precisa de los materiales utilizados en la estructura del pavimento. Esta caracterización varía sustancialmente entre pavimentos flexibles y rígidos, dado que las propiedades dominantes, los mecanismos de deterioro y las condiciones de carga son diferentes. El éxito del diseño estructural está directamente vinculado a la calidad de los parámetros introducidos y su coherencia con las condiciones ambientales y de tráfico locales.

3.2. Caracterización del tráfico en el diseño de pavimentos

El tráfico vehicular constituye una de las variables más determinantes en el diseño estructural de pavimentos. A diferencia de los métodos empíricos tradicionales, que suelen simplificarlo mediante un valor agregado como el Número de Ejes Equivalentes (ESALs), el enfoque mecanístico-empírico caracteriza el tráfico de manera multidimensional, no solo se consideran las cargas equivalentes, sino también la distribución de pesos por eje, configuraciones vehiculares, espectros de carga, repeticiones, velocidad, variabilidad temporal y estacional, en tal sentido el método M-E requiere una representación detallada y probabilística del espectro de carga vehicular que incide sobre la estructura durante su vida de servicio. Esta caracterización detallada permite calcular con mayor precisión las respuestas mecánicas (tensiones, deformaciones, deflexiones) que originan los modos de deterioro de los pavimentos, tanto flexibles como rígidos.

3.2.1. Principios generales

En el diseño M-E, el tráfico no se resume en un solo valor acumulado, sino que se modela mediante un conjunto de variables que permiten simular la respuesta estructural del pavimento ante múltiples tipos de vehículos, configuraciones de ejes, y niveles de carga.

La interacción entre el espectro de carga y la estructura del pavimento es modelada en cada paso de análisis, y los efectos acumulados del daño se estiman con base en leyes de deterioro calibradas.

Dentro de los Principios de la caracterización de tráfico en el método M-E tenemos:

- Uso de *espectros de carga por eje* en lugar de equivalencias simplificadas.
- Inclusión de diferentes configuraciones de ejes: simples, tándem, triples y cuádruples.
- Consideración de la *carga dinámica transmitida al pavimento*, dependiente de suspensión, neumáticos, velocidad y superficie.
- Modelado temporal y espacial del tránsito, con factores de estacionalidad y de dirección.

3.2.2. *Parámetros esenciales para la caracterización del tráfico*

En el enfoque mecanístico-empírico de diseño de pavimentos, la caracterización adecuada del tránsito constituye un insumo crítico, dado que las solicitaciones inducidas por los vehículos representan la principal fuente de deterioro estructural.

Clasificación vehicular. Se debe establecer una clasificación estandarizada de vehículos, según normativa FHWA o local. El modelo mecanístico-empírico requiere la clasificación detallada de los vehículos en categorías predefinidas. La FHWA emplea el esquema de 13 clases, basado en el número de ejes, su espaciamiento y configuración.

- *Clases 1 a 3:* Vehículos livianos (automóviles, camionetas).
- *Clases 4 a 13:* Vehículos pesados, categorizados por el número y configuración de ejes (doble, tándem, tridem, etc.).

Cada clase debe ser representada por su proporción diaria promedio (en porcentaje) y su frecuencia relativa a lo largo del año.

Alternativamente, las normativas locales pueden definir categorías adaptadas a la realidad del transporte nacional. La precisión en la asignación de clases vehiculares es crucial, pues cada configuración de ejes genera patrones de esfuerzo diferentes en el pavimento.

Volumen de tránsito inicial (AADTT).. El *Average Annual Daily Truck Traffic* (tránsito promedio diario anual de camiones) corresponde al número de vehículos pesados que circulan por el carril de diseño en un día promedio del año inicial de servicio. Este valor se obtiene a partir de estaciones permanentes de conteo, aforos temporales ajustados mediante factores de expansión o encuestas de transporte. En el método M-E, el *AADTT* es la base para la generación de los espectros de carga, los cuales son aplicados sobre el pavimento en los análisis de daño acumulado. Un valor subestimado puede inducir a diseños inseguros, mientras que un valor sobrestimado conduce a sobrecostos innecesarios.

Espectro de carga por eje (P_{ij}). Los espectros de carga constituyen la distribución de frecuencias de cargas por eje, clasificados por tipo de eje (i) y categoría de vehículo (j). Se definen a partir de pesajes dinámicos en movimiento (*Weigh-In-Motion, WIM*) o estaciones de pesaje estático.

Cada vehículo pesado posee múltiples ejes, y cada eje puede portar diferentes magnitudes de carga. El espectro de carga representa la distribución estadística de cargas por tipo de eje:

- *Eje simple*: eje delantero.
- *Eje tandem*: dos ejes cercanos actuando conjuntamente.
- *Eje tridem*: tres ejes en conjunto.

El espectro de carga se representa mediante histogramas que muestran la frecuencia de ocurrencia de cargas dentro de rangos establecidos (bins) para cada tipo de eje. Estos espectros permiten modelar con precisión la variabilidad de magnitudes de carga, en lugar de asumir un único valor promedio. En el método M-E, los espectros de carga son convertidos en tensiones y deformaciones mediante modelos mecánicos de respuesta estructural, y posteriormente relacionados con el deterioro mediante modelos de transferencia empírica.

Distribución direccional (DD) y por carril (DL). El factor de distribución direccional (DD) representa la proporción del volumen total de camiones que circula en la dirección de diseño (generalmente el 50 % en carreteras de dos sentidos, aunque puede variar). El factor de distribución por carril (DL) expresa la fracción de camiones que utilizan el carril de diseño, el cual soporta la mayor carga acumulada durante el horizonte de análisis. En vías con múltiples carriles, DL depende del número de carriles, las políticas de operación y la jerarquía funcional de la carretera. El método M-E incorpora ambos factores para transformar el $AADTT$ en un flujo efectivo de carga sobre el carril de diseño.

Factores de crecimiento del tráfico. El crecimiento del tránsito se modela mediante tasas anuales que proyectan el $AADTT$ inicial hacia el horizonte

de diseño. Matemáticamente, se expresa como:

$$AADTT_t = AADTT_0 \cdot (1 + g)^t \quad (3.17)$$

donde:

$AADTT_t$ = Tránsito promedio diario anual de camiones en el año t [veh/día].

$AADTT_0$ = Tránsito promedio diario anual de camiones en el año inicial de servicio [veh/día].

g = Tasa anual de crecimiento del tránsito (adimensional).

t = Año de servicio considerado dentro del horizonte de diseño [años].

Para modelar el incremento de tráfico durante el periodo de diseño, se emplean funciones de crecimiento anual compuesto o patrones proyectados. Alternativamente, pueden emplearse proyecciones logísticas, lineales o modelos de crecimiento saturado.

Velocidad de operación (V).. La velocidad de operación influye en el tiempo de carga aplicado sobre el pavimento, afectando la respuesta viscoelástica de la carpeta asfáltica y la magnitud de deformaciones permanentes. En pavimentos flexibles, una mayor velocidad reduce la duración del pulso de carga, limitando la fluencia plástica; en cambio, en pavimentos rígidos, el efecto es menos sensible. El método M:E integra la variable V en la caracterización del módulo dinámico del asfalto y en la evaluación de la transferencia de carga en juntas.

Horizonte de diseño (n).. El horizonte de diseño (n) representa el periodo de vida útil estructural para el cual se dimensiona el pavimento, usualmente entre 20 y 40 años en proyectos de carreteras de alta jerarquía. Durante este intervalo se evalúa la acumulación de daño por cargas repetidas y las condiciones ambientales. En el método M-E n condiciona directamente el número de repeticiones de carga consideradas en los modelos de fatiga y deformación permanente.

Factores de estacionalidad (SF).. Los factores de estacionalidad permiten ajustar el $AADTT$ promedio anual para reflejar las variaciones mensuales

o estacionales en el flujo de camiones. Esto es especialmente relevante en regiones donde el transporte de productos agrícolas, mineros o industriales presenta marcada estacionalidad. El método M-E incorpora SF para distribuir las cargas a lo largo del año y capturar su interacción con las variaciones climáticas estacionales (temperatura, humedad y congelamiento), lo que mejora la precisión en la predicción del desempeño.

3.2.3. Modelos de representación de la carga

Espectro de cargas por eje.

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (3.18)$$

donde:

P_{ij} : probabilidad de que el eje i tenga una carga dentro del intervalo j .

N_{ij} : número de repeticiones del eje i en el intervalo j .

N_i : número total de repeticiones del eje i .

Ley de Miner modificada para acumulación de daño.

$$D = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{n_{ij}}{N_{f,ij}} \quad (3.19)$$

donde:

D : daño acumulado por fatiga.

n_{ij} : repeticiones de carga en la clase j del eje i .

$N_{f,ij}$: número de repeticiones a la falla bajo esa condición de carga.

Tiempo de carga y efecto de la velocidad.

$$t_c = \frac{2a}{V} \quad (3.20)$$

donde:

t_c : tiempo de aplicación de la carga.

a : semiancho de contacto de la huella de neumático.
 V : velocidad del vehículo.

3.2.4. Métodos de obtención de datos

- Estaciones de pesaje dinámico (WIM).
- Aforos manuales y automáticos.
- Pesajes estáticos puntuales.
- Modelos de tránsito proyectado según crecimiento económico y flujos comerciales.

3.2.5. Relevancia en el diseño mecanístico-empírico

- Permite modelar los modos de deterioro críticos:
 - En pavimentos flexibles: ahuellamiento, fatiga por flexión, fisuración térmica, reflexión de grietas.
 - En pavimentos rígidos: agrietamiento por fatiga, bombeo, escalonamiento en juntas y erosión.
- El uso de espectros de carga por eje reemplaza la dependencia exclusiva de los ESALs.
- Mejora la predicción de desempeño y la calibración local del método M-E.

3.2.6. Importancia de una caracterización precisa

La predicción del daño acumulado en el pavimento está directamente relacionada con la precisión en la representación del tráfico. Una subestimación del espectro de carga o del volumen puede conducir a fallas prematuras, mientras que una sobreestimación implica sobrediseño y sobrecostos.

Finalmente, la caracterización del tráfico bajo el enfoque mecanístico-empírico transforma el diseño de pavimentos, pasando de un modelo simplificado a un modelo estocástico, dinámico y multivariable. Esto reduce la incertidumbre, optimiza recursos y prolonga la vida útil de las estructuras viales.

3.3. Caracterización del clima y medio ambiente en el diseño de pavimentos

El desempeño de los pavimentos está fuertemente influenciado por el clima y el medio ambiente. En el método M-E, las condiciones climáticas son modeladas de forma explícita mediante módulos ambientales acoplados, los cuales simulan la evolución del contenido de humedad y temperatura en las capas del pavimento, así como sus efectos sobre las propiedades de los materiales, la generación de esfuerzos térmicos y los mecanismos de deterioro.

El comportamiento de los pavimentos depende de la interacción entre las cargas del tránsito, las propiedades de los materiales y las condiciones ambientales. El enfoque mecanístico-empírico reconoce que el *clima y el medio ambiente* modifican las propiedades mecánicas e hidráulicas de los materiales, influyendo directamente en el desempeño estructural y la vida útil de los pavimentos.

La caracterización climática en el método M-E se realiza mediante el *Módulo de Análisis Climático (Climate Module, CLM)*, el cual procesa datos meteorológicos horarios y aplica modelos de transferencia de calor y humedad para estimar el estado termohidráulico de cada capa del pavimento en función del tiempo y la profundidad.

3.3.1. Importancia del clima en el diseño M-E

Las condiciones climáticas afectan el desempeño del pavimento a través de los siguientes mecanismos principales:

- Cambios en las propiedades mecánicas de los materiales (ej. módulo resiliente, módulo dinámico).
- Variación del contenido de humedad en capas no tratadas y subrasante.
- Formación de hielo y descongelamiento estacional en zonas frías.
- Inducción de esfuerzos térmicos en losas de concreto por gradientes de temperatura.
- Degradación acelerada de ligantes asfálticos por oxidación y UV.

Por ello, el diseño M-E integra un modelo ambiental que simula el perfil climático hora a hora, y lo acopla con los modelos estructurales y de deterioro.

3.3.2. Variables climáticas fundamentales

El modelo climático del método M-E requiere una base de datos climática horaria o diaria que contenga las siguientes variables:

- *Temperatura del aire y gradientes térmicos*: afectan la rigidez de las mezclas asfálticas (E^*) y generan curling y warping en losas de concreto.
- *Precipitación y humedad*: influyen en la variación estacional del módulo resiliente (M_r) de capas granulares y subrasante, y favorecen fenómenos de bombeo y erosión.
- *Congelamiento y deshielo*: producen levantamientos diferenciales en suelos con agua libre y pérdida de rigidez tras el deshielo.
- *Radiación solar, humedad relativa y viento*: condicionan la contracción por secado del concreto y la evaporación en capas superficiales.
- *Cobertura de nubes o radiación solar*

Estas variables permiten simular con precisión la transferencia de calor y de humedad entre la atmósfera y el pavimento.

3.3.3. Modelos empleados en el método M-E

Transferencia de calor (ecuación de Fourier). Calcula el perfil de temperatura en las capas del pavimento, incluyendo efectos de conducción, convección y radiación. Se resuelve la ecuación de conducción de calor unidimensional:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.21)$$

donde:

T : temperatura en la capa ($^{\circ}\text{C}$).

t : tiempo (h).

z : profundidad (m).

α : difusividad térmica del material (m^2/s).

Balance de humedad (ecuación de Richards). Simula el movimiento de humedad dentro de las capas no tratadas y la subrasante. El modelo considera

evaporación, infiltración, escorrentía y capilaridad.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [K(\theta) (\nabla h + 1)] \quad (3.22)$$

donde:

θ : contenido volumétrico de agua.

$K(\theta)$: conductividad hidráulica no saturada.

h : potencial matricial.

t : tiempo.

Modelo de congelamiento-descongelamiento.

$$L_f \cdot \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.23)$$

donde:

L_f : calor latente de fusión del agua.

θ_i : contenido volumétrico de agua congelada.

k : conductividad térmica del material.

T : temperatura en la capa (°C).

3.3.4. Estaciones climáticas y generación de datos

Los datos climáticos pueden obtenerse de:

- *Estaciones meteorológicas locales*: Preferentemente con series de varios años.
- *Redes satelitales o grillas climáticas (ej. MERRA, ERA5)*: Útiles para interpolar datos faltantes o para zonas sin estaciones.
- *Herramientas como el LTPPBind o software de interfaz*: Permiten la selección de estaciones climáticas predefinidas, o la importación de datos personalizados en formato CRF.

El uso de datos representativos de largo plazo es fundamental para capturar la variabilidad interanual.

3.3.5. *Impacto del clima en el desempeño del pavimento*

Pavimentos flexibles.

- *Modulación del módulo dinámico:* Las altas temperaturas reducen la rigidez de las mezclas asfálticas, aumentando el riesgo de deformaciones permanentes, produciendo disminución del E^* a altas temperaturas y susceptibilidad a agrietamiento térmico a bajas temperaturas.
- *Capas granulares y subrasante:* reducción del M_r bajo condiciones de saturación y debilitamiento estacional tras deshielo.
- *Cambio del módulo resiliente de subrasante:* La humedad elevada reduce la capacidad de soporte, especialmente en suelos arcillosos.
- *Fenómeno de stripping:* Potencializado en climas cálidos y húmedos, debido a la acción del agua y el gradiente térmico.

Pavimentos rígidos.

- *Gradientes térmicos:* Pueden generar esfuerzos diferenciales entre la parte superior e inferior de la losa, provocando alabeo, deformaciones térmicas e higroscópicas que generan curling, warping y fisuración.
- *Congelamiento y bombeo:* En zonas con heladas, el agua atrapada debajo de la losa puede causar pérdida de soporte al descongelarse.
- *Fatiga térmica:* Por expansión y contracción repetitiva debido a ciclos diarios y estacionales de temperatura.
- *Estructura global del pavimento:* variaciones de tensiones y deformaciones que modifican la predicción de ahuellamiento, fatiga y bombeo.

3.3.6. *Integración del clima al diseño M-E*

El procedimiento general incluye:

1. Selección de la estación climática o ingreso de datos locales. Utilización de bases de datos climáticas horarias (NOAA u organismos locales) con variables de temperatura, humedad, precipitación, radiación solar y viento.
2. Cálculo mensual de perfiles de temperatura y humedad para cada capa del pavimento mediante el CLM.
3. Cálculo del perfil horario de temperatura y humedad en las capas.

4. Modificación de las propiedades materiales según clima. Ajuste dinámico de las propiedades de materiales:
 - E^* en mezclas asfálticas.
 - M_r en capas granulares y subrasante.
 - k en pavimentos rígidos.
 - α_t en losas de concreto.
5. Simulación del daño mecánico acumulado considerando clima variable.

Cada mes de análisis representa una condición climática distinta, y se repite el ciclo durante el periodo de diseño (20–40 años típicamente).

Cuadro 3.1: Parámetros climáticos requeridos por el método M-E.

Parámetro	Función en el diseño
Temperatura del aire	Cálculo del perfil térmico
Precipitación	Simulación del ingreso de agua
Humedad relativa	Estimación de evaporación
Velocidad del viento	Influencia en la evaporación superficial
Radiación solar	Estimación del calentamiento superficial

3.3.7. Relevancia técnica y científica

La caracterización climática en el diseño M-E permite capturar de forma detallada la interacción entre el medio ambiente y la estructura del pavimento a través de ecuaciones de transferencia de calor y humedad, espectros climáticos horarios y variaciones estacionales de propiedades. Este enfoque supera ampliamente los métodos empíricos tradicionales al considerar variaciones estacionales, gradientes térmicos y ciclos de humedad, lo cual redundará en diseños más seguros, durables y costo-efectivos. Para lograrlo, se requiere el uso de modelos térmicos e hidráulicos acoplados y una base de datos climática robusta y representativa del sitio del proyecto. Adicionalmente:

- Sustituye factores promedio por modelos físico-matemáticos transitorios.
- Permite evaluar la variabilidad estacional y anual, crítica en climas

tropicales húmedos, áridos o fríos.

- Aumenta la confiabilidad en la predicción del deterioro y la vida útil del pavimento.
- Facilita la gestión de infraestructura mediante estrategias ajustadas al ambiente local.

principales Métodos de Diseño de pavimentos con el enfoque Mecanístico-Empírico

El diseño mecanístico–empírico (ME) se fundamenta en la estimación de las respuestas estructurales internas del pavimento (tensiones, deformaciones y deflexiones) bajo cargas de tráfico y condiciones ambientales, que posteriormente son transformadas en predicciones de desempeño mediante modelos empíricos calibrados. A diferencia de los métodos puramente empíricos, los métodos M-E permiten la incorporación explícita de propiedades de materiales, variabilidad climática y cargas vehiculares reales.

La tendencia internacional apunta hacia la consolidación de los métodos de diseño mecanístico-empíricos como norma para el diseño estructural de pavimentos. En este capítulo presentamos los principales métodos M-E vigentes a nivel mundial, destacando su base teórica, estructura, estado de implementación y particularidades técnicas.

4.1. MEPDG / AASHTOWare Pavement ME Design (Estados Unidos)

El método fue desarrollado originalmente como parte del proyecto *NCHRP 1-37A* (2004) y más tarde adoptado como *MEPDG* (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*). En 2011 fue convertido en una herramienta comercial denominada *AASHTOWare Pavement ME Design*, respaldada por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Actualmente, es el sistema M-E más completo y extendido a nivel mundial.

La Guía de Diseño de Pavimentos Mecanístico-Empírica (MEPDG) representa una transformación significativa en la ingeniería vial, al fusionar modelos de comportamiento estructural con validación empírica. Su adopción ha permitido mejorar la predicción del desempeño a largo plazo de los pavimentos y optimizar los recursos disponibles para su construcción y rehabilitación (Li et al., 2011).

El MEPDG ofrece una metodología robusta, científica y adaptable al diseño moderno de pavimentos. Su adopción global está en expansión, ofreciendo un marco sólido para una ingeniería vial más eficiente y sostenible.

4.1.1. Fundamentos teóricos y evolución

El MEPDG constituye una evolución del diseño empírico AASHTO, integrando principios mecanicistas con modelos de transferencia empírica. Este enfoque híbrido permite modelar la respuesta estructural del pavimento y vincularla con el desempeño real medido en campo (AASHTO, 2008; Program, 2004).

El MEPDG se basa en dos enfoques fundamentales:

- *Mecánico*: cálculo de respuestas internas del pavimento (deformaciones, tensiones, deflexiones) ante cargas aplicadas, mediante modelos estructurales.
- *Empírico*: predicción de deterioros utilizando modelos calibrados con datos reales (como fisuración, ahuellamiento y pérdida de suavidad).

Esta metodología supera al método empírico tradicional de AASHTO 1993,

proporcionando mayor precisión, adaptabilidad y realismo en los diseños (Baus & Stires, 2010).

4.1.2. Estructura metodológica

El método se organiza en un flujo que parte de la definición del problema, la incorporación de datos de tránsito, clima y materiales, pasando por el análisis de respuesta estructural y concluyendo en la predicción del desempeño (AASHTO, 2008; FHWA, 2015).

El MEPDG incorpora más de cien parámetros de entrada clasificados en tres grandes grupos:

- *Tráfico*: espectros de carga por eje, número de repeticiones, distribución por carril.
- *Clima*: datos meteorológicos horarios para simular efectos térmicos e hídricos.
- *Materiales y estructura*: módulos dinámicos, de resiliencia, coeficientes térmicos, entre otros.

Los diseños son iterativos, comparando la respuesta estructural con umbrales de desempeño (e.g., índice de rugosidad internacional) para verificar su confiabilidad (Baus & Stires, 2010; Coree et al., 2005).

Entradas jerárquicas de datos. Los insumos se clasifican en niveles jerárquicos (1–3), donde el Nivel 1 corresponde a ensayos específicos de proyecto, mientras que los Niveles 2 y 3 se basan en modelos predictivos o valores por defecto (AASHTO, 2008; FHWA, 2013).

Modelos de materiales y envejecimiento. En mezclas asfálticas, el módulo dinámico $|E^*|$ se representa con curvas máster y leyes de envejecimiento. En materiales granulares y suelos, el módulo resiliente depende de esfuerzos y humedad. En concretos hidráulicos, parámetros como el CTE y la retracción son críticos (AASHTO, 2008; Bulut et al., 2013).

Acoplamiento clima–estructura. El modelo EICM simula condiciones horarias de temperatura y humedad en el sistema pavimento-subrasante, gene-

rando perfiles que alimentan las propiedades mecánicas de los materiales (Bulut et al., 2013; FHWA, 2008).

Tránsito y espectros de carga. El tránsito se caracteriza mediante *AADTT*, tasas de crecimiento, distribución direccional, factores estacionales y, sobre todo, espectros de carga por eje obtenidos de estaciones WIM (AASHTO, 2008; FHWA, 2013).

Predicción de desempeño. Los indicadores clave incluyen ahuellamiento, fisuración por fatiga, fisuración térmica, *faulting* y rugosidad (IRI). La comparación con límites admisibles determina la aceptabilidad del diseño (AASHTO, 2008; FHWA, 2015).

Criterios de fiabilidad. El método exige verificar la confiabilidad del diseño, considerando la variabilidad de los modelos y de las condiciones de entrada. La práctica moderna recomienda niveles de fiabilidad entre 85–95 % (AASHTO, 2008; of Transportation, 2025).

4.1.3. Estado de implementación

El software AASHTOWare Pavement ME Design (PMED) es la herramienta oficial que operacionaliza el MEPDG. Su adopción ha sido gradual en los DOTs de EE.UU., con experiencias documentadas en diversos estados (Department, 2023; FHWA, 2015).

Desafíos del MEPDG. Los principales retos del MEPDG incluyen:

- Alta demanda de datos y capacitación especializada.
- Necesidad de calibración local de modelos.
- Evolución constante del software y metodologías.

A pesar de estos desafíos, su implementación ha demostrado ser técnica y económicamente beneficiosa.

4.1.4. Calibración local y transferencia

La precisión del método mejora sensiblemente con la calibración regional, ajustando los coeficientes de las funciones de transferencia. Estudios recientes destacan la importancia de la calibración multi-estado y regional (Islam et al., 2023; Sakhaeifar et al., 2019).

4.2. El método mecanístico–empírico de diseño de pavimentos del TAC (Canadá)

El método mecanístico–empírico de la *Transportation Association of Canada* (TAC), con soporte del programa nacional *Canadian Long-Term Pavement Performance* (C-LTPP), constituye la base normativa oficial para el diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados en Canadá desde finales de la década de 1990 y actualizado en ediciones recientes del *Pavement Design and Management Guide* (TAC, 2013). Su creación respondió a la necesidad de superar las limitaciones de los métodos empíricos derivados del AASHO Road Test, los cuales no reflejaban adecuadamente las condiciones de tráfico, clima y materiales propias de regiones frías y con ciclos intensos de congelamiento–deshielo.

Este método se centra en la integración de modelos mecanicistas de respuesta estructural, funciones de deterioro calibradas con datos locales y procedimientos explícitos de fiabilidad y análisis probabilístico. El método es una adaptación del enfoque mecanístico-empírico original del MEPDG, ajustado a las condiciones climáticas, materiales y prácticas de diseño propias de Canadá (Doré et al., 2006).

4.2.1. Base teórica

El TAC M–E Design se fundamenta en:

- *Análisis estructural multicapa*: se emplea la teoría de elasticidad multicapa para calcular deformaciones y tensiones críticas en la carpeta asfáltica, capas granulares y subrasante, considerando propiedades elásticas equivalentes dependientes de la temperatura.
- *Modelos de fatiga y ahuellamiento*: la predicción del deterioro se basa en leyes de fatiga calibradas en laboratorios canadienses y en funciones empíricas que correlacionan la deformación permanente acumulada con la vida útil esperada del pavimento.
- *Integración de clima*: el método incluye modelos de congelamiento–deshielo, variación estacional de los módulos resilientes de suelos y pérdida de soporte en bases no tratadas. Estos efectos se modelan me-

dianter coeficientes estacionales de ajuste.

- *Enfoque de fiabilidad*: el diseño requiere definir un nivel de probabilidad de cumplimiento frente a las variaciones en tránsito, clima y propiedades de materiales. Se aplican distribuciones estadísticas (normal y log-normal) para representar la variabilidad de parámetros.

El enfoque TAC M-E mantiene la filosofía mecanístico-empírica:

- Modelado mecánico de respuestas estructurales: deformaciones, tensiones, deflexiones.
- Predicción empírica de deterioros: fisuración, ahuellamiento, rugosidad.
- Diseño iterativo: evaluación de desempeño contra umbrales de confiabilidad.

4.2.2. Estructura metodológica

El procedimiento de diseño incluye las siguientes fases:

- *Caracterización del tránsito*: se utilizan valores de *AADTT*, tasas de crecimiento, espectros de carga y factores de estacionalidad, considerando la alta proporción de vehículos pesados en corredores de transporte de recursos naturales.
- *Caracterización del clima*: el método asigna coeficientes estacionales de módulo (M_r) para subrasante y capas granulares, en función de ciclos de congelamiento–deshielo y del nivel de humedad.
- *Caracterización de materiales*: incluye módulo dinámico de mezclas asfálticas, propiedades resilientes de materiales no ligados y parámetros de erosión y soporte para bases estabilizadas.
- *Análisis estructural*: se emplea un modelo multicapa para determinar deformaciones horizontales a tracción en la base de la carpeta (ε_t), deformaciones verticales en la subrasante (ε_v) y deflexiones superficiales.
- *Predicción de deterioro*: se aplican ecuaciones empíricas locales para fisuración por fatiga, ahuellamiento en subrasante y capas granulares, así como deterioro superficial asociado a ciclos de congelamiento–deshielo.

- *Criterios de diseño*: se establecen umbrales de desempeño (porcentaje máximo de fisuración, profundidad de ahuellamiento admisible y condiciones de serviciabilidad).
- *Evaluación probabilística*: se aplican análisis de Monte Carlo y métodos de confiabilidad de primer orden (FORM) para cuantificar la probabilidad de falla.

4.2.3. *Particularidades técnicas*

El TAC M–E Design presenta elementos distintivos respecto a otros métodos internacionales:

- *Énfasis en clima frío*: el tratamiento del congelamiento–deshielo y la variación estacional de módulos es mucho más detallado que en el MEPDG original.
- *Calibración canadiense*: los modelos de fatiga y ahuellamiento están basados en bases de datos de desempeño de carreteras canadienses y ensayos acelerados en pistas experimentales.
- *Flexibilidad metodológica*: permite el uso de tres niveles de entrada (1–3), dependiendo de la disponibilidad de ensayos de laboratorio, similar al MEPDG.
- *Análisis probabilístico integrado*: desde sus primeras versiones incorpora la confiabilidad explícita, mientras que el MEPDG inicial la introdujo de manera más limitada.

Adaptaciones Canadienses.

Base Climática Nacional Se construyó una base de datos con más de 90 estaciones meteorológicas distribuidas por Canadá, representando todas las regiones climáticas relevantes. Esta información fue integrada al software Pavement ME Design para mejorar la precisión de simulaciones (Popik et al., 2013).

Caracterización Local de Materiales Las agencias provinciales realizaron ensayos para caracterizar el módulo dinámico, comportamiento térmico

y resistencia de mezclas asfálticas, concretos y materiales granulares típicos. Esta información reemplaza los valores por defecto del MEPDG.

Calibración Empírica Local Se utilizó información histórica de bases PMS (Pavement Management Systems) de provincias como Ontario para calibrar modelos de predicción del deterioro (Swan et al., 2008). Aunque los modelos de fatiga y fisuración térmica mostraron buen ajuste, los de rugosidad y deformación resultaron menos precisos.

4.2.4. Estado de implementación

El método es aplicado en la mayoría de jurisdicciones canadienses para proyectos de carreteras nacionales, urbanas y regionales. El TAC actualiza periódicamente sus guías de diseño, incorporando:

- Avances en modelación viscoelástica de mezclas asfálticas.
- Consideraciones de sustentabilidad y ciclo de vida.
- Integración con sistemas de gestión de pavimentos (PMS).

Aplicación Municipal: Caso de Toronto. La ciudad de Toronto aplicó el método TAC M-E a su red vial municipal, evidenciando buenas predicciones para agrietamiento por fatiga y temperatura. Sin embargo, la modelación de rugosidad no fue óptima en entornos urbanos con cargas intermitentes y superficies reparadas (Swan et al., 2006).

Comparación con el MEPDG. Aunque ambos métodos comparten la filosofía mecanístico–empírica, presentan diferencias relevantes:

- El MEPDG utiliza el modelo EICM para simular el clima hora a hora, mientras que el TAC emplea un esquema estacional simplificado pero calibrado para climas fríos.
- El TAC fue diseñado con menor dependencia de bases de datos extensivas como el LTPP, lo que lo hace más adaptable en regiones con información limitada.
- El MEPDG incorpora mayor cantidad de indicadores de desempeño (IRI, fisuración top–down, *faulting*), mientras que el TAC se enfoca

en fisuración por fatiga, ahuellamiento y serviciabilidad.

Herramientas y Software. La implementación se realiza mediante:

- *AASHTOWare Pavement ME Design*: Adaptado con clima y materiales canadienses.
- *OPECC*: Software mecanístico-empírico desarrollado por LCMB para evaluar mezclas con escoria de acero y otros materiales sostenibles (Dion et al., 2015).

Ventajas y desafíos.

Ventajas:

- Mejor adaptación a clima frío y mezclas locales.
- Mejora en predicción de fisuración térmica y por fatiga.
- Aplicación en contextos municipales y rurales.

Desafíos:

- Necesidad de gran cantidad de datos locales.
- Limitaciones en la modelación de rugosidad.
- Capacitación técnica en el uso del software.

4.3. La Guía Austroads para el diseño mecánico–empírico de pavimentos (Australia y Nueva Zelanda)

La *Austroads Pavement Design Guide* es la normativa oficial de diseño de pavimentos en Australia y Nueva Zelanda, reconocida internacionalmente por su enfoque mecánico–empírico consolidado y por la amplia base de datos experimental que la respalda. Publicada por primera vez en la década de 1990, y actualizada en ediciones posteriores (2010, 2017, 2021), esta guía constituye el marco de referencia para el dimensionamiento estructural de pavimentos en países con condiciones climáticas variables, desde regiones tropicales húmedas hasta zonas áridas y templadas.

Su desarrollo estuvo orientado a superar las limitaciones de los métodos empíricos tradicionales y a incorporar explícitamente las propiedades de los materiales, la magnitud real de las cargas vehiculares y las condiciones ambientales específicas de la región.

La guía Austroads proporciona una estructura moderna, científica y adaptable al diseño de pavimentos. Su continua mejora mediante investigación local, calibración y adaptación climática la posicionan como referente en el mundo.

4.3.1. Base teórica

El método Austroads se sustenta en los siguientes pilares:

- *Análisis mecanicista de respuesta estructural*: se utiliza un modelo elasto–multicapa basado en la teoría de Boussinesq y Burmister, el cual calcula tensiones, deformaciones y deflexiones críticas en las diferentes capas del pavimento bajo cargas repetidas.
- *Modelos de deterioro empíricos*: la predicción del desempeño se realiza mediante funciones calibradas localmente que relacionan las respuestas críticas con modos de deterioro (fatiga en mezclas asfálticas, ahuellamiento en capas granulares y subrasante).
- *Criterio de acumulación de daño*: se aplica la Ley de Miner para la sumatoria de daños por cargas repetidas, considerando la variabilidad de espectros de carga a lo largo de la vida útil.

- *Enfoque de fiabilidad*: el diseño se efectúa con niveles explícitos de confiabilidad, incorporando la dispersión estadística de parámetros de materiales, tránsito y clima.

4.3.2. Estructura metodológica

El procedimiento de diseño en la Guía Austroads comprende:

- *Definición del tránsito*: se calcula el número acumulado de repeticiones de carga de vehículos pesados (*ESA, Equivalent Standard Axles*) proyectado para el horizonte de diseño. El concepto de ESA constituye un pilar central en este método.
- *Caracterización de materiales*: se determinan módulos resilientes para capas granulares y suelos, módulo dinámico para mezclas asfálticas y propiedades mecánicas de concretos hidráulicos, mediante ensayos estandarizados en la región.
- *Análisis estructural*: se calculan deformaciones críticas: (i) deformación horizontal a tracción en la base de la carpeta asfáltica (ε_t), (ii) deformación vertical de compresión en la subrasante (ε_v).
- **Predicción de deterioro**:
 - Fatiga de mezclas asfálticas: función empírica calibrada con ensayos de laboratorio y tramos de prueba.
 - Ahuellamiento: funciones separadas para capas asfálticas, granulares y subrasante.
 - Serviciabilidad: relacionada con el nivel de ahuellamiento y la extensión de fisuración.
- *Criterios de desempeño*: se establecen umbrales de deterioro (profundidad máxima de ahuellamiento, porcentaje máximo de fisuración por fatiga) que no deben ser superados antes del horizonte de diseño.
- *Evaluación probabilística*: se integran factores de fiabilidad para garantizar que el pavimento cumpla con el desempeño esperado en condiciones de incertidumbre.

Estructura de la Guía. La guía está compuesta por varias partes especializadas:

- Parte 2: Diseño estructural de pavimentos.
- Parte 4: Caracterización de materiales (4A para ligantes, 4B para asfaltos).
- Parte 5: Evaluación estructural y rehabilitación.
- Parte 6: Tratamientos superficiales.
- Parte 8: Sostenibilidad y uso de materiales reciclados.

La herramienta principal de análisis estructural es **AustPADS**, un software que implementa modelos de elementos finitos para evaluar la respuesta a carga de los sistemas de pavimento (Moffatt, 2017).

4.3.3. *Particularidades técnicas*

La Guía Austroads se distingue por:

- *Uso del concepto de Ejes Estándar Equivalentes (ESA)*: a diferencia del MEPDG (que emplea espectros completos de carga), Austroads se basa en la equivalencia de cargas repetidas de un eje estándar de 80 kN, aunque con factores de conversión calibrados para vehículos de la región.
- *Adaptación a climas diversos*: la metodología permite ajustes según zonas tropicales, áridas o templadas, incluyendo coeficientes de variación estacional de módulos.
- *Modelos simplificados de predicción*: el deterioro se modela con funciones relativamente sencillas, lo que facilita su aplicación práctica sin necesidad de grandes bases de datos climáticas.
- *Enfoque pragmático*: el método se diseñó para su aplicación eficiente en proyectos reales de carretera, con balances entre precisión y practicidad.

Modelos de Transferencia de Desempeño. El modelo Shell de fatiga fue históricamente utilizado, pero estudios han demostrado que **subestima la vida útil** de mezclas densas típicas de Nueva Zelanda, llevando a sobreestimación del espesor (Saleh, 2014).

Por ello, se han desarrollado modelos calibrados localmente:

- Universidad de Canterbury propuso un modelo ajustado a contenido

de vacíos y ligante efectivo.

- Reducción de 26–27 % del espesor comparado con el modelo Shell original (Saleh, 2011).

Adaptaciones Locales en Nueva Zelanda. La guía se adapta mediante un suplemento nacional que considera:

- Acumulación de deformación plástica en capas granulares.
- Criterios de deformación específicos para suelos locales.
- Comportamiento conservador para bajos niveles de tránsito, y menos conservador para altos volúmenes (Gribble & Patrick, 2008).

4.3.4. Evaluación y Rehabilitación

La Parte 5 se enfoca en diagnóstico estructural mediante equipos como FWD. Se establecen procedimientos para:

- Análisis estructural de deflexiones.
- Identificación de modos de deterioro (fisuración, rugosidad).
- Selección de tratamiento óptimo (Jameson & Shackleton, 2008).

4.3.5. Aplicaciones Prácticas

Casos reales muestran que pavimentos diseñados con Austroads han superado los 50 años de vida útil, especialmente aquellos con superficies delgadas y mantenimiento periódico (Arampamoorthy & Patrick, 2010). Esto confirma la validez del enfoque combinado entre diseño mecánico y modelos de deterioro.

4.3.6. Estado de implementación

La Guía Austroads es utilizada oficialmente por todas las agencias viales de Australia y Nueva Zelanda. Se ha convertido en un estándar de referencia no solo regional, sino también para países en vías de desarrollo que buscan adoptar metodologías ME adaptadas a contextos con recursos limitados. Las versiones más recientes incorporan:

- Nuevos modelos para mezclas asfálticas con ligantes modificados.

- Consideraciones de sustentabilidad y análisis de ciclo de vida.
- Actualización de factores de confiabilidad y umbrales de desempeño.

4.3.7. Comparación con el MEPDG y otros métodos

En relación con el MEPDG de AASHTO y el TAC canadiense, la Guía Austroads presenta diferencias clave:

- *Clima*: Austroads utiliza factores de ajuste estacionales simplificados, mientras que el MEPDG emplea el modelo climático EICM y el TAC introduce módulos ajustados por ciclos de congelamiento–deshielo.
- *Tránsito*: Austroads sigue basándose en ESA como indicador unificado, mientras que el MEPDG y TAC emplean espectros completos de carga por eje.
- *Calibración*: Austroads está fuertemente calibrado con ensayos australianos y neozelandeses, lo que garantiza alta representatividad local.
- *Indicadores de desempeño*: Austroads se centra en ahuellamiento y fatiga; el MEPDG incorpora más indicadores (IRI, fisuración top–down, *faulting*), lo que implica mayor complejidad.

4.4. El método mecanístico–empírico ALIZE–LCPC (Francia)

El método ALIZE–LCPC fue desarrollado en Francia por el *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC, hoy IFSTTAR) en colaboración con el SETRA (*Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes*). Surge en la década de 1970 como respuesta a la necesidad de un sistema de diseño adaptado a las condiciones europeas, especialmente a:

- El tráfico creciente de vehículos pesados en la red nacional francesa.
- La diversidad de climas (templado oceánico, continental y mediterráneo).
- La disponibilidad de materiales granulares y mezclas bituminosas con características propias de la región.

El núcleo del método se consolidó en la versión ALIZE III (años 90), y desde entonces se ha perfeccionado en sucesivas actualizaciones. Actualmente, es la herramienta oficial en Francia para el diseño estructural de pavimentos flexibles y semi-rígidos.

El método ALIZE-LCPC se distingue por su robustez teórica, el uso de modelos viscoelásticos avanzados y su adaptación tanto a carreteras como a aeropuertos. Su continua evolución lo mantiene como referente internacional en el diseño mecanístico-empírico de pavimentos.

4.4.1. Base teórica

El ALIZE–LCPC se sustenta en la teoría de elasticidad multicapa y en la combinación de criterios mecanicistas y empíricos:

- *Modelo estructural multicapa*: el pavimento se modela como un sistema de capas elásticas, isotropas y homogéneas, apoyado en una semiespacial elástica (Burmister, 1943). El cálculo se realiza bajo el principio de superposición lineal.
- *Respuestas críticas*: se determinan las deformaciones horizontales a tracción en la base de la carpeta bituminosa (ε_t) y las deformaciones verticales de compresión en la parte superior de la subrasante (ε_v).
- *Criterios de diseño*: el método aplica leyes de fatiga y ahuellamiento

calibradas con extensas campañas de laboratorio (ensayos de fatiga en vigas de mezcla bituminosa) y pistas aceleradas de prueba en Nantes.

- *Acumulación de daño*: se emplea la Ley de Miner para el cómputo del daño acumulado, considerando la repetición de cargas de tráfico durante el horizonte de diseño.

4.4.2. Estructura metodológica

El procedimiento de diseño en ALIZE–LCPC incluye:

- *Definición del tráfico*: se emplea el concepto de *trafic cumulé en poids lourds* (número acumulado de pasadas de vehículos pesados), convertido a ejes equivalentes mediante coeficientes empíricos franceses.
- *Caracterización de materiales*:
 - Mezclas bituminosas: módulo complejo E^* determinado en laboratorio, leyes de fatiga calibradas por LCPC.
 - Capas tratadas con cemento: propiedades elásticas y de fisuración por retracción.
 - Materiales granulares y suelos: módulo resiliente dependiente de confinamiento y humedad.
- *Análisis estructural*: cálculo de esfuerzos y deformaciones críticas mediante el software ALIZE (actualmente versión ALIZE–LCPC 3.0 y sucesivas).
- *Modelos de deterioro*
- *Verificación de criterios*: se compara la vida predicha con el horizonte de diseño (20–30 años), adoptando factores de seguridad y niveles de fiabilidad predefinidos.

Estructura del Diseño. El proceso iterativo de diseño incluye:

- Definición del espectro de tráfico.
- Caracterización de materiales: módulos resilientes, propiedades viscoelásticas.
- Simulación mediante el software **ALIZE**.
- Verificación contra criterios de desempeño (fatiga, deformación permanente).

- Ajuste de espesores hasta cumplir con la vida útil proyectada.

4.4.3. *Particularidades técnicas*

El método ALIZE–LCPC presenta características diferenciales respecto a otros sistemas:

- *Calibración nacional*: se fundamenta en una extensa base de datos francesa de ensayos acelerados y tramos instrumentados.
- *Adaptación a pavimentos semi-rígidos*: considera explícitamente capas tratadas con cemento, comunes en Francia, modelando su riesgo de fisuración refleja.
- *Enfoque práctico*: a diferencia del MEPDG, que emplea simulaciones horarias de clima, ALIZE utiliza coeficientes estacionales simplificados para los módulos.
- *Herramienta de software accesible*: el programa ALIZE es de uso estandarizado en proyectos de diseño y rehabilitación en Francia y se distribuye ampliamente a nivel internacional.

Aplicaciones Aeroportuarias. El método fue extendido al diseño de *pavimentos aeroportuarios* mediante la versión ALIZE-Airfield, en cooperación con la Dirección Técnica de Aviación Civil (STAC). Esta versión considera:

- Configuraciones complejas de trenes de aterrizaje.
- Efectos acumulados de deformaciones en subrasante.
- Ensayos a escala real en Toulouse-Blagnac para calibración de modelos (Caron et al., 2010; Mounier et al., 2015).

4.4.4. *Estado de implementación*

El método ALIZE–LCPC es obligatorio en Francia y ha sido adoptado, con ajustes, en otros países francófonos y europeos. Sus actualizaciones han incorporado:

- Consideraciones de mezclas bituminosas con ligantes modificados.
- Enfoques de sustentabilidad (uso de materiales reciclados).
- Recomendaciones de durabilidad frente al cambio climático y aumento de tráfico pesado.

4.4.5. Comparación con otros métodos

En contraste con el MEPDG (EE.UU.), el TAC (Canadá) y la Guía Austroads (Australia y Nueva Zelanda):

- *Tránsito*: ALIZE emplea equivalencias de ejes pesados acumulados, mientras que el MEPDG y el TAC utilizan espectros de carga detallados.
- *Clima*: ALIZE aplica factores estacionales simplificados, en tanto que el MEPDG usa el EICM y el TAC coeficientes de congelamiento–deshielo.
- *Materiales*: ALIZE se adapta mejor a pavimentos semi–rígidos y a la modelación de capas tratadas con cemento, menos comunes en el MEPDG.
- *Complejidad*: el MEPDG es más detallado y exigente en insumos, mientras que ALIZE prioriza la practicidad y la adaptación a la realidad constructiva francesa.

Comparado con AASHTOWare ME (EE.UU.), el método francés es más simple, pero altamente calibrado para condiciones locales. En países tropicales, el ALIZE produce espesores menores (hasta 8–10 % menos) en capas tratadas con cemento respecto a AASHTO 1993, lo que se traduce en ahorros económicos y ambientales (Mengue et al., 2018).

Estudios comparativos entre ALIZE y métodos estadounidenses han demostrado:

- La sensibilidad del modelo a la temperatura, reduciendo la vida útil en climas cálidos.
- Mayores deformaciones permanentes en suelos afectados por ciclos de congelamiento–descongelamiento (Ktari et al., 2020).

4.5. El método mecanístico–empírico basado en DCP (Sudáfrica)

Desarrollado por el *Council for Scientific and Industrial Research* (CSIR) y agencias regionales. Es un método práctico y adaptable a condiciones de países en desarrollo con alta variabilidad de materiales.

Sudáfrica ha sido pionera en el desarrollo de métodos mecanístico–empíricos de diseño de pavimentos, con énfasis en el uso de herramientas prácticas de campo. El *South African Mechanistic Design Method* (SAMDM) se consolidó en la década de 1980, fundamentado en análisis multicapa y criterios de fatiga y ahuellamiento.

Una de las innovaciones más relevantes fue la integración del **Dynamic Cone Penetrometer (DCP)** como herramienta principal para la caracterización in situ de suelos y materiales granulares. El DCP permitió extender el método mecanístico–empírico a proyectos de bajo y mediano volumen de tránsito, donde la disponibilidad de ensayos de laboratorio avanzados es limitada.

El método M-E basado en DCP constituye una referencia mundial por su eficiencia, bajo costo y robustez técnica. Su evolución hacia el *SAPDM* refuerza el papel del DCP como herramienta clave en países con limitaciones de recursos, manteniendo una base científica sólida. Actualmente, el enfoque DCP–ME constituye un estándar en varios países africanos y ha sido adoptado como método alternativo en proyectos de cooperación internacional en Asia y Latinoamérica.

4.5.1. Fundamentos teóricos

El método se basa en tres pilares:

- *Ensayo DCP*: consiste en hincar un cono metálico estándar en el suelo mediante golpes de un martillo de peso constante. El resultado se expresa como la *penetración por golpe* (mm/golpe), que refleja la resistencia del material.
- *Correlaciones empíricas*: a partir de extensas bases de datos sudafricanas, el índice DCP se correlaciona con parámetros geotécnicos como

el CBR (*California Bearing Ratio*) y el módulo resiliente (M_r).

- *Modelo mecanicista*: los módulos obtenidos se introducen en un análisis multicapa para calcular deformaciones críticas en carpeta y subrasante, y posteriormente aplicar leyes de fatiga y ahuellamiento.

4.5.2. Metodología

El procedimiento de diseño DCP–ME comprende los siguientes pasos:

- *Campaña de campo*: ejecución de perfiles de DCP a lo largo del eje de la carretera, obteniendo valores de penetración por golpe para cada estrato.
- *Conversión a parámetros mecánicos*: mediante correlaciones empíricas:

$$CBR = k_1 \cdot (DPI)^{-k_2} \quad (4.1)$$

donde:

CBR = Índice de soporte californiano obtenido a partir de correlaciones con el ensayo DCP [%].

DPI = Índice de penetración dinámica, expresado como profundidad media de penetración por golpe [mm/golpe].

k_1, k_2 = Coeficientes empíricos calibrados regionalmente [adimensional].

$$M_r = k_3 \cdot (CBR)^{k_4} \quad (4.2)$$

donde:

M_r = Módulo resiliente del suelo o material granular [MPa].

CBR = Índice de soporte californiano derivado de la correlación con el ensayo DCP [%].

k_3, k_4 = Coeficientes empíricos de calibración ajustados a suelos locales [adimensional].

- *Análisis estructural*: aplicación de teoría elasto–multicapa para calcular:
 - ε_t : deformación a tracción en la base de la carpeta asfáltica (criterio de fatiga).
 - ε_v : deformación vertical de compresión en la subrasante (criterio de ahuellamiento).
- *Modelos de deterioro*: se aplican funciones de fatiga y de deformación permanente calibradas con bases sudafricanas.
- *Criterios de aceptación*: se establecen límites de ahuellamiento (≤ 20 mm) y vida a fatiga en función del tráfico acumulado.

4.5.3. Particularidades técnicas

El método DCP–ME presenta características singulares:

- *Simplicidad y rapidez*: el ensayo DCP puede ejecutarse en campo con bajo costo y sin equipamiento sofisticado.
- *Representatividad in situ*: captura directamente la variabilidad espacial de los suelos y materiales, evitando errores de muestreo.
- *Correlaciones locales*: requiere calibración específica para cada región, dado que la relación entre DCP, CBR y M_r depende del tipo de suelo.
- *Adecuación a bajo volumen de tránsito*: especialmente útil para carreteras rurales y redes secundarias, aunque también aplicable en proyectos mayores con respaldo de datos complementarios.

4.5.4. Estado de implementación

El método es utilizado de forma sistemática en Sudáfrica y ha sido transferido a varios países en desarrollo debido a su bajo costo. La *South African Road Authority* promueve el uso de perfiles DCP como requisito en estudios geotécnicos. Además:

- Existen guías y software asociados (p.ej., *DCP–D Methods*).
- Se han desarrollado correlaciones para diferentes tipos de suelos africanos, desde arenas hasta suelos lateríticos.
- Ha sido adoptado en proyectos de cooperación por organismos multi-

laterales (Banco Mundial, Banco Africano de Desarrollo).

Evolución y Revisiones.

- *Primera generación (1970–1996)*: desarrollo inicial con base en ensayos de campo y laboratorio.
- *SAMDM (1996)*: formalización del método como normativa nacional (Theyse et al., 1996).
- *Revisión 2007–2015*: incorporación de modelos avanzados de daño y calibración con APT y LTPP (Kanenemeyer et al., 2015; Theyse et al., 2007).
- *SAPDM (2016 en adelante)*: nueva versión basada en datos de desempeño a largo plazo y protocolos modernos de módulo dinámico y deformación permanente (Anochie-Boateng & Maina, 2012; Anochie-Boateng et al., 2016).

4.5.5. Comparación con otros métodos

En relación con otros enfoques mecanístico–empíricos:

- *Versus MEPDG (EE.UU.)*: el DCP–ME es mucho más sencillo y depende de correlaciones empíricas; el MEPDG utiliza espectros de carga y simulaciones climáticas avanzadas.
- *Versus TAC (Canadá)*: el TAC se centra en clima frío y módulos estacionales; el DCP–ME prioriza la caracterización rápida de suelos en climas cálidos y variables.
- *Versus Austroads (Australia–NZ)*: ambos usan equivalencia de ejes estándar, pero Austroads se basa en ensayos de laboratorio más avanzados; el DCP–ME se orienta a entornos con recursos limitados.
- *Versus ALIZE–LCPC (Francia)*: ALIZE aplica modelos detallados de fatiga y materiales tratados; el DCP–ME mantiene correlaciones empíricas simples.

4.5.6. relevancia internacional

El método DCP–ME sudafricano constituye un ejemplo exitoso de integración de:

- Un ensayo de campo práctico y económico (DCP).
- Correlaciones empíricas calibradas localmente (DCP–CBR– M_r).
- Un marco mecanístico–empírico simplificado, pero robusto para condiciones reales.

Su relevancia internacional radica en su adaptabilidad y en su impacto en países con recursos limitados, donde constituye una alternativa confiable y aplicable frente a métodos más sofisticados como el MEPDG.

Aplicaciones Recientes. El método se ha aplicado en:

- Evaluación de vehículos especiales y factores de equivalencia de carga (Beer et al., 2009).
- Programas de rehabilitación y gestión de pavimentos rurales.
- Diseño de pavimentos urbanos delgados y reciclados.

4.6. El método de diseño de pavimentos del DMRB (Reino Unido)

El *Design Manual for Roads and Bridges* (DMRB) es el compendio normativo oficial para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras en Inglaterra, Escocia, Gales e Irlanda del Norte. Fue publicado inicialmente en 1992 por la *Highways Agency* (hoy *National Highways*) y actualmente se actualiza de manera continua en línea.

El DMRB integra múltiples documentos y estándares técnicos, entre los cuales destacan las secciones dedicadas al diseño estructural de pavimentos. Tradicionalmente, el enfoque británico fue empírico, basado en catálogos de secciones normalizadas y en la equivalencia de cargas expresadas en *msa* (millones de ejes estándar). Sin embargo, en las últimas dos décadas el sistema ha evolucionado hacia un enfoque mecanístico–empírico, incorporando criterios de respuesta estructural y modelos de fatiga y ahuellamiento calibrados con datos locales.

El DMRB constituye un método robusto, accesible y confiable, diseñado para equilibrar precisión estructural con practicidad en la implementación. Representa un puente entre los métodos empíricos tradicionales y los sistemas mecanístico-empíricos modernos.

4.6.1. Base teórica

El método DMRB se apoya en los siguientes fundamentos:

- *Modelo elasto–multicapa*: para pavimentos flexibles, se emplea el análisis de capas múltiples para calcular deformaciones y tensiones bajo cargas repetidas, similar a los métodos Burmister.
- *Criterios de diseño*: se definen en términos de:
 - Deformación a tracción en la base de la carpeta asfáltica (ε_t) como criterio de fatiga.
 - Deformación vertical de compresión en la subrasante (ε_v) como criterio de ahuellamiento.
 - Resistencia a la fisuración y a la pérdida de capacidad estructural en capas tratadas.

- *Relación carga–deterioro*: se emplea la Ley de Miner para acumular daño por repeticiones de carga, integrando espectros de tránsito vehicular.
- *Confiabilidad*: se incorporan factores de seguridad y márgenes de diseño en función de la importancia funcional de la vía.

4.6.2. Estructura metodológica

El proceso de diseño en el DMRB incluye:

- *Determinación del tránsito*: se proyecta el número acumulado de repeticiones de ejes estándar (*msa*, millones de ejes de 80 kN) durante el horizonte de diseño, que típicamente varía entre 20 y 40 años.
- *Selección preliminar de secciones*: se emplean catálogos de estructuras tipo, adaptadas a diferentes categorías de tráfico y clases de suelo de fundación.
- *Análisis mecanicista*: para proyectos de alta relevancia (autopistas, corredores de tráfico pesado), se requiere modelación multicapa, verificando deformaciones críticas en carpeta y subrasante.
- *Modelos de deterioro*:
 - Fatiga del asfalto: funciones empíricas calibradas con ensayos del TRL (*Transport Research Laboratory*).
 - Ahuellamiento: expresiones derivadas de pruebas de pista aceleradas en Reino Unido.
 - Degradación funcional: relación entre deterioro estructural y nivel de serviciabilidad.
- *Verificación y ajuste*: se comparan las predicciones con los criterios normativos, ajustando espesores de capas hasta cumplir con los requisitos de desempeño y vida útil proyectada.

4.6.3. Particularidades técnicas

El método DMRB presenta características singulares respecto a otros sistemas:

- *Uso combinado de catálogos y análisis mecanicista*: permite aplicar soluciones rápidas mediante secciones tipo en proyectos estándar, o

enfoques detallados con análisis de respuesta en proyectos de alta relevancia.

- *Enfoque en msa*: mantiene el concepto empírico de acumulación de ejes estándar, pero lo complementa con criterios mecanicistas.
- *Énfasis en condiciones locales*: los modelos de deterioro están calibrados con materiales y climas del Reino Unido, incluyendo zonas de alta humedad y heladas moderadas.
- *Requisitos de fiabilidad*: el DMRB establece factores de seguridad diferenciados por clase de carretera, importancia estratégica y riesgo operativo.

4.6.4. Estado de implementación

Actualmente, el DMRB es de uso obligatorio en todos los proyectos de la red nacional de carreteras británicas. Sus actualizaciones más recientes incluyen:

- Integración con políticas de sostenibilidad y reciclaje de materiales.
- Recomendaciones para mezclas asfálticas con ligantes modificados.
- Consideraciones de ciclo de vida y análisis de costos de mantenimiento.
- Procedimientos explícitos de análisis mecanístico para tráfico superiores a 80–100 *msa*.

4.6.5. Comparación con otros métodos

En relación con otros sistemas mecanístico–empíricos internacionales:

- *Versus MEPDG (EE.UU.)*: el DMRB mantiene un enfoque más simplificado, priorizando el uso de catálogos y *msa*, mientras que el MEPDG utiliza espectros de carga completos y modelación climática horaria (EICM).
- *Versus TAC (Canadá)*: el TAC incorpora análisis probabilístico explícito, mientras que el DMRB mantiene un enfoque más determinista con factores de seguridad.
- *Versus Austroads (Australia–NZ)*: ambos comparten la filosofía de catálogos combinados con análisis mecanicista, pero Austroads utiliza

los *ESA* (Ejes Estándar Equivalentes), en tanto que el DMRB mantiene los *msa*.

- *Versus ALIZE–LCPC (Francia)*: el ALIZE es más mecanicista, centrado en modelos elásticos multicapa y leyes de fatiga, mientras que el DMRB aún conserva un fuerte componente empírico.

4.7. MEPDG - China

China ha experimentado un crecimiento exponencial en su red vial desde la década de 1990, consolidando la mayor red de autopistas del mundo. Inicialmente, el diseño de pavimentos se regía por las especificaciones nacionales (*Specifications for Design of Highway Asphalt Pavements*, JTG D50-2006), con base eminentemente empírica, apoyada en catálogos de secciones y en la equivalencia de cargas mediante ejes estándar.

Sin embargo, la diversidad climática del país —desde regiones frías del norte, con ciclos intensos de congelamiento–deshielo, hasta zonas tropicales y áridas en el sur y oeste—, sumada a la alta proporción de tráfico pesado y sobrecargas, evidenció las limitaciones de estos métodos empíricos. Esto impulsó la investigación académica y aplicada para introducir el enfoque mecanístico–empírico.

El MEPDG en China se encuentra en fase de consolidación mediante *calibración local y adaptación regional*, mostrando mejoras notables frente a los métodos tradicionales. Con el fortalecimiento de bases de datos nacionales y avances en caracterización de materiales, se espera que el MEPDG se convierta en la referencia dominante en el diseño de pavimentos en China.

4.7.1. Adopción del enfoque MEPDG

El *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), desarrollado en EE.UU., sirvió de referencia metodológica y conceptual para los investigadores chinos. No obstante, su aplicación directa no era viable por tres motivos principales:

- Diferencias en espectros de tráfico: en China, los vehículos pesados suelen estar sobrecargados y presentan distribuciones de ejes distintas a las consideradas en el LTPP estadounidense.
- Diversidad climática extrema: el MEPDG estadounidense está calibrado con el EICM y bases de datos de Norteamérica, que no reflejan las condiciones locales chinas (monzones, suelos congelados estacionales, regiones áridas).
- Materiales locales: el uso de ligantes, agregados y técnicas constructivas específicas en China requería modelos de fatiga y deformación

calibrados regionalmente.

Esto dio lugar a programas de investigación nacionales que adaptaron y extendieron el MEPDG a las condiciones locales.

4.7.2. *Base teórica y metodológica*

El MEPDG chino conserva la misma estructura metodológica fundamental:

- *Análisis estructural multicapa*: cálculo de tensiones, deformaciones y deflexiones bajo cargas repetidas mediante teoría elasto–multicapa.
- *Modelos de deterioro*: aplicación de leyes empíricas de fatiga y ahuellamiento, recalibradas con datos locales.
- *Acoplamiento climático*: desarrollo de un modelo climático chino (*China Pavement Environment Model*, CPEM), que reemplaza o complementa al EICM.
- *Fiabilidad*: incorporación de enfoques probabilísticos y de análisis de riesgo.

4.7.3. *Avances específicos en China*

- *Calibración de fatiga*: se han realizado extensos ensayos en laboratorio con mezclas asfálticas chinas (ligantes convencionales, modificados con polímeros y caucho) para redefinir las ecuaciones de fatiga.
- *Ahuellamiento*: se calibraron funciones específicas de deformación permanente para climas cálidos y húmedos, donde este modo de falla es crítico.
- *Tránsito*: China cuenta con sistemas de pesaje dinámico (*Weigh-In-Motion*, WIM) que han generado espectros de carga propios, muy diferentes a los estadounidenses, con mayor proporción de sobrecargas.
- *Clima*: el CPEM modela variaciones térmicas, humedad y ciclos de congelamiento–deshielo adaptados a regiones continentales y monzónicas, con mayor precisión que el EICM para condiciones locales.

Implementación y Calibración Local. Diversos estudios han trabajado en la adaptación del MEPDG a condiciones chinas:

- *Sensibilidad de parámetros*: Se ha demostrado que el espesor estructural, el contenido de vacíos y la granulometría influyen significativamente en el desempeño previsto, particularmente en ahuellamiento y fisuración (Zhang et al., 2014).
- *Fisuración por bajas temperaturas*: En regiones de congelamiento estacional, como Heilongjiang, fue necesario calibrar el modelo de fisuración térmica del MEPDG, logrando un mejor ajuste con datos de campo nacionales (Ma et al., 2015).
- *Comparaciones internacionales*: Frente a los métodos chinos tradicionales de pavimentos de hormigón, el MEPDG demostró mayor capacidad predictiva y potencial para reducir fallas prematuras (Li et al., 2007).

4.7.4. *Particularidades técnicas*

El MEPDG–China presenta diferencias notables frente al MEPDG original:

- *Tránsito*: se introducen factores de sobrecarga que reflejan el peso real de los vehículos en autopistas y carreteras principales.
- *Materiales*: se incluyen curvas máster de mezclas asfálticas modificadas, de uso extendido en el país.
- *Clima*: uso del CPEM en lugar del EICM, adaptado a estaciones de monitoreo meteorológico locales.
- *Calibración local*: los modelos de deterioro fueron recalibrados con bases de datos de secciones de prueba nacionales, incluyendo autopistas de tráfico muy pesado.

4.7.5. *Estado de implementación*

Actualmente, el MEPDG adaptado se aplica principalmente en proyectos de autopistas nacionales y corredores estratégicos. Las autoridades chinas han promovido:

- El uso de espectros de carga nacionales en el diseño.
- La integración del método en software nacional de diseño de pavimentos.

- El desarrollo de calibraciones regionales diferenciadas por zonas climáticas (norte frío, sur húmedo, oeste árido).

4.7.6. Comparación con otros métodos

- *Versus MEPDG (EE.UU.):* China adapta el modelo climático y calibra espectros de carga y leyes de deterioro; EE.UU. mantiene los modelos originales del LTPP.
- *Versus TAC (Canadá):* ambos integran modelos de clima adaptados (CPEM)

4.8. MEPDG en Costa Rica

Costa Rica cuenta con una red vial compuesta por autopistas nacionales, carreteras cantonales y caminos rurales, que atraviesan una topografía montañosa y una diversidad climática marcada por la estacionalidad lluviosa y seca. La red primaria concentra el tránsito pesado, particularmente asociado a puertos y corredores logísticos estratégicos (Pacífico–Caribe). Tradicionalmente, el país utilizó el método AASHTO 93 y el CBR como base empírica para el diseño estructural de pavimentos. Sin embargo, la alta pluviosidad, los suelos volcánicos con alta variabilidad mecánica y el crecimiento del tránsito pesado pusieron en evidencia las limitaciones de los enfoques empíricos.

Costa Rica ha logrado avances notables en la implementación del enfoque M-E, especialmente a través del trabajo del **Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME-UCR)**, que ha liderado investigaciones y desarrollos aplicados desde hace más de una década. Este laboratorio ha generado una base sólida de datos de desempeño de pavimentos, propiedades dinámicas de materiales, clima y tráfico, incluyendo estaciones de pesaje en movimiento (*WIM*) y campañas sistemáticas de deflectometría (*FWD*). Además, ha realizado estudios de calibración local de modelos del *MEPDG*, adaptando sus parámetros a condiciones tropicales, de alta humedad y a suelos volcánicos. Si bien aún no existe una norma nacional de diseño estructural M-E formalmente adoptada por el gobierno, LANAMME-UCR ha desarrollado metodologías, guías y herramientas de diseño que permiten aplicar el enfoque M-E con rigor técnico en proyectos específicos de infraestructura vial, incluyendo diseños con materiales reciclados, ligantes modificados y pavimentos rígidos. Costa Rica es así uno de los líderes regionales en capacidades técnicas y generación de conocimiento para el diseño de pavimentos mediante el enfoque mecanístico-empírico.

Costa Rica no solo ha *calibrado el MEPDG*, sino que también desarrolló una herramienta propia —el *CRME*— adaptada a sus condiciones locales. Este esfuerzo pionero posiciona al país como referente en América Latina en la transición hacia metodologías mecanístico-empíricas modernas.

4.8.1. *Introducción del MEPDG en Costa Rica*

El *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) comenzó a ser estudiado en Costa Rica en la década de 2010. LANAMME-UCR desarrolló proyectos de investigación piloto que analizaron la viabilidad de aplicar el MEPDG en corredores de alta importancia estratégica, evaluando la adaptación de:

- Archivos climáticos para el modelo EICM, a partir de estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN).
- Espectros de carga vehicular, utilizando aforos y estaciones de pesaje en carretera.
- Caracterización de materiales locales (mezclas asfálticas con agregados volcánicos, bases granulares locales y suelos residuales).

Aunque aún no se aplica de manera generalizada en todo el país, constituye un avance hacia la modernización del diseño de pavimentos en América Central, con potencial de extenderse a la región en el futuro cercano.

4.8.2. *Base metodológica aplicada*

En Costa Rica, el MEPDG conserva su estructura internacional, pero con énfasis en factores locales:

- *Tránsito*: se emplean aforos permanentes en carreteras primarias, con proyecciones de crecimiento que consideran la importancia de los puertos (Caldera y Moín). La presencia de sobrecargas ha requerido factores de corrección en los espectros de carga.
- *Clima*: el modelo EICM se ha alimentado con datos de estaciones locales de precipitación, temperatura y humedad relativa, para simular las variaciones estacionales en la respuesta de los materiales. La estacionalidad marcada (invierno lluvioso y verano seco) ha sido clave en la calibración climática.
- *Materiales*: las mezclas asfálticas utilizan agregados de origen volcánico (basálticos y andesíticos), con ligantes convencionales y modificados. El comportamiento de los suelos residuales tropicales también ha requerido correlaciones locales de módulo resiliente.
- *Estructura*: se evalúan pavimentos flexibles y compuestos, con énfasis

en la fatiga de mezclas bituminosas y el ahuellamiento en subrasantes saturadas.

4.8.3. Modelos de deterioro y calibración

El MEPDG en Costa Rica ha requerido ajustes y calibraciones locales:

- *Fatiga*: se han realizado ensayos de laboratorio en vigas de mezcla asfáltica para ajustar la ecuación de vida a fatiga.
- *Ahuellamiento*: se observó que el modelo original del MEPDG subestimaba la deformación en climas húmedos; se ajustaron parámetros de deformación permanente en capas granulares y subrasante.
- *IRI*: la predicción del índice de regularidad internacional se ha calibrado con base en mediciones de la red vial nacional, considerando la rápida pérdida de serviciabilidad en carreteras sin drenaje adecuado.

4.8.4. Particularidades técnicas en Costa Rica

El proceso de adaptación del MEPDG en Costa Rica presenta singularidades relevantes:

- *Alta pluviosidad*: la infiltración de agua y el mal drenaje lateral incrementan la vulnerabilidad a deformación permanente y pérdida de soporte.
- *Suelos residuales*: requieren caracterización cuidadosa debido a su comportamiento altamente dependiente de la humedad y a la presencia de vacíos estructurales.
- *Red vial estratégica*: el diseño se centra en corredores logísticos nacionales, donde el tránsito pesado es significativamente mayor que el promedio regional.
- *Tráfico*: espectros obtenidos en estaciones permanentes y móviles.
- *Clima*: condiciones tropicales con alta temperatura y humedad, modeladas explícitamente en CRME.
- *Materiales*: mezclas asfálticas caracterizadas localmente con asfaltos convencionales y modificados.
- *Infraestructura experimental*: uso de APT para validar y calibrar modelos de deterioro.

4.8.5. Estado de implementación

Actualmente, el MEPDG se encuentra en fase de uso selectivo:

- *Proyectos piloto*: implementado en autopistas concesionadas y corredores estratégicos.
- *Investigación aplicada*: liderada por LANAMME-UCR, con estudios de desempeño en campo.
- *Capacitación*: programas de formación de ingenieros y técnicos en el uso del MEPDG y el software AASHTOWare Pavement ME Design.

Experiencias de Calibración. Los principales avances fueron liderados por el *LanammeUCR*:

- Desarrollo del *modelo Witzak–Lanamme*, una versión calibrada del modelo de Witzak que predice con mayor precisión el módulo dinámico de mezclas asfálticas locales (Loria et al., 2011).
- Obtención de *espectros de carga locales* mediante estaciones de pesaje y monitoreo en carreteras nacionales.
- Incorporación de *factores climáticos tropicales* (temperaturas mensuales y humedad), que influyen en el comportamiento de las capas granulares y del asfalto.

Desarrollo del Software CRME. Un hito importante fue la creación del software *CRME (Costa Rica Mechanistic-Empirical Design Software)*, desarrollado por la Universidad de Costa Rica:

- Basado en teoría multicapa elástica para calcular respuestas estructurales.
- Incluye modelos calibrados con datos de *pistas de ensayo acelerado de pavimentos (APT)* en Costa Rica.
- Permite el uso de espectros de carga completos o simplificados (EALF).
- Integra efectos de clima mediante el índice de humedad de Thornthwaite y temperaturas mensuales.
- Implementa el modelo Witzak–Lanamme como opción principal para estimar el módulo dinámico (Trejos-Castillo et al., 2018).

4.9. MEPDG - América Latina

América Latina cuenta con una red vial heterogénea, en la cual coexisten autopistas de primer orden con altos volúmenes de tránsito y redes rurales de bajo estándar. Las condiciones climáticas son altamente variables, desde climas tropicales húmedos (Amazonía), áridos (Atacama), templados (Cono Sur) hasta zonas de altura con ciclos de congelamiento–deshielo (Andes). Históricamente, el diseño de pavimentos en la región se ha apoyado en métodos empíricos como el AASHTO 93 y catálogos nacionales (ejemplo: Chile, Colombia, Perú, México), además de enfoques simplificados basados en CBR y ejes equivalentes. No obstante, el crecimiento del tránsito pesado, la incorporación de materiales locales no convencionales y las exigencias de durabilidad han impulsado el interés por el enfoque mecanístico–empírico, con el MEPDG como principal referencia internacional.

América Latina se encuentra en una fase de transición hacia el diseño estructural M-E. Los desafíos principales incluyen la falta de calibración local, la escasez de datos de tráfico y desempeño a largo plazo, y la limitada infraestructura de laboratorios para caracterización avanzada de materiales. En tal sentido, la adopción del enfoque M-E en América Latina es aún incipiente, aunque con signos de avance progresivo con experiencias destacadas en Chile y Costa Rica que sirven como referencia regional. Algunos países han iniciado procesos de implementación parcial del *MEPDG* o han adaptado modelos propios. La mayoría de países aún utiliza el método AASHTO-93 o catálogos estructurales empíricos, con algunos intentos de transición hacia el paradigma M-E en entornos académicos o proyectos piloto.

4.9.1. Adopción y transferencia tecnológica

La introducción del MEPDG en América Latina se ha producido a través de:

- *Investigación académica*: universidades y centros de investigación han liderado proyectos de calibración local (ejemplo: Universidad de los Andes en Colombia, Universidad de São Paulo en Brasil, Pontificia Universidad Católica de Chile).
- *Proyectos piloto*: en autopistas concesionadas y carreteras de gran es-

cala, se han implementado diseños basados en MEPDG, muchas veces en paralelo con AASHTO 93 para efectos comparativos.

- *Asistencia técnica internacional:* organismos multilaterales como el Banco Mundial, BID y CAF han promovido el uso de metodologías modernas de diseño como parte de proyectos de infraestructura.

4.9.2. *Base metodológica adoptada*

El MEPDG en la región conserva la estructura fundamental:

- *Tránsito:* incorporación de *AADTT*, espectros de carga por eje y tasas de crecimiento. La dificultad principal radica en la escasez de estaciones de pesaje dinámico (WIM), lo que obliga a usar factores de equivalencia simplificados.
- *Clima:* el uso del EICM requiere bases meteorológicas detalladas. En muchos países se han generado archivos climáticos adaptados a estaciones nacionales, aunque no siempre con la resolución requerida.
- *Materiales:* los módulos dinámicos de mezclas asfálticas, el módulo resiliente de suelos y la caracterización de concretos hidráulicos aún no se realizan de manera sistemática. En varios países se emplean correlaciones y valores por defecto.
- *Análisis estructural:* uso de modelos multicapa para pavimentos flexibles y de losas para pavimentos rígidos.
- *Modelos de deterioro:* las funciones de transferencia se han tomado de la calibración norteamericana, con ajustes preliminares en proyectos piloto.

El MEPDG en América Latina conserva los fundamentos del modelo original:

- *Modelación mecánica:* cálculo de tensiones y deformaciones mediante teoría elástica multicapa.
- *Modelos empíricos de transferencia:* ajustados originalmente con bases de datos norteamericanas, lo que demanda su recalibración en contextos latinoamericanos.
- *Sistema jerárquico de entradas:* niveles 1–3 que permiten ajustar la calidad de datos en función de su disponibilidad (Orobio, 2010).

4.9.3. Avances específicos en países

- *Brasil*: ha liderado la calibración local del módulo dinámico $|E^*|$ para mezclas con ligantes modificados y reciclados. Se han desarrollado espectros de carga propios en corredores de alto tránsito.
- *Chile*: ha trabajado en la adaptación del MEPDG para carreteras concesionadas, con énfasis en climas áridos y montañosos, y en el uso de pavimentos compuestos. Desde 2004 se han recolectado *espectros de carga locales* para autopistas principales, los cuales mostraron diferencias significativas con los predeterminados del MEPDG. También se desarrollaron curvas maestras de módulo dinámico y se obtuvieron factores de calibración preliminares para fisuración transversal y fallas en pavimentos de hormigón. Comparaciones con el método chileno basado en AASHTO 93 evidencian que el MEPDG ofrece diseños más racionales (Delgadillo et al., 2011).
- *Colombia*: universidades han realizado investigaciones sobre calibración de modelos de fatiga y ahuellamiento con mezclas locales y bases de datos de tramos instrumentados. Investigaciones han empleado análisis de sensibilidad para determinar los parámetros más influyentes en el desempeño del MEPDG, destacando la relevancia del contenido de vacíos y el módulo resiliente de la subrasante (Orobio, 2010; Orobio & Zaniewski, 2011).
- *México*: se han incorporado conceptos del MEPDG en normativas nacionales y estudios de factibilidad de autopistas de alta capacidad.
- *Perú*: se han iniciado investigaciones sobre calibración regional en climas andinos, donde el efecto de la altura, temperaturas extremas y radiación solar generan condiciones únicas.

4.9.4. Particularidades técnicas

El MEPDG en América Latina presenta retos y adaptaciones específicas:

- *Tránsito*: la sobrecarga de vehículos pesados es frecuente y dificulta la aplicación directa de factores de equivalencia o espectros norteamericanos.
- *Clima*: la diversidad de zonas bioclimáticas exige calibraciones dife-

renciadas (tropical, árido, templado, alta montaña).

- *Materiales*: gran parte de las mezclas asfálticas utilizan ligantes de origen local y agregados de diferente naturaleza (basálticos, calcáreos, volcánicos), lo que afecta su desempeño en fatiga y deformación.
- *Capacidad institucional*: no todos los organismos de carreteras cuentan con laboratorios ni estaciones WIM, lo que limita la aplicación de Niveles 1 de entrada.

4.9.5. Estado de implementación

Actualmente, el MEPCG en América Latina se encuentra en fase de:

- *Investigación y calibración*: liderada por universidades y centros de investigación.
- *Aplicación parcial*: en proyectos de gran escala (autopistas concesionadas, carreteras nacionales estratégicas).
- *Exploración normativa*: algunos países han iniciado discusiones sobre la actualización de sus manuales nacionales para incluir enfoques mecanístico–empíricos.

Finalmente, el futuro del método en la región dependerá de la consolidación de redes de monitoreo, la calibración local de modelos y la actualización normativa en cada país.

Epílogo

Los pavimentos concebidos bajo el enfoque mecanístico–empírico deben responder a condiciones de servicio que, probablemente, cambiarán durante su vida útil. La fortaleza del enfoque M–E radica en separar nítidamente *respuestas* y *modelos de daño*, permitiendo recalibrar los segundos a partir de evidencia observacional sin renunciar al control mecánico de las primeras. El desafío ya no es solo calcular, sino *aprender* del desempeño en operación.

Síntesis. Este libro articuló: (i) respuestas estructurales fundamentadas (tensiones–deformaciones críticas, gradientes térmicos e higroscópicos, transferencia de carga en juntas), (ii) caracterizaciones realistas de materiales, tránsito y clima, y (iii) criterios de desempeño con confiabilidad explícita. La transferencia efectiva de metodologías internacionales exige disciplina en datos, rigor estadístico y cultura de auscultación que cierre el ciclo diseño–construcción–conservación.

Agenda de trabajo. (1) *Calibración regional sistemática*: repositorios abiertos de fallas y desempeño con metadatos de materiales, construcción y clima, para estimar factores de transferencia robustos por zona ecológica

y clase de vía. (2) *Géminos digitales (digital twins)*: acople de modelos M–E con monitoreo en tiempo real (temperatura, humedad, deflexiones, LTE) y actualización bayesiana para mantenimiento óptimo. (3) *Sostenibilidad y PRS*: integración de desempeño estructural con ACV y especificaciones relacionadas con desempeño para materiales convencionales y reciclados. (4) *Clima cambiante*: generación de *años representativos de clima* bajo escenarios regionalizados y su traducción a perfiles de daño y resiliencia frente a extremos. (5) *Analítica avanzada responsable*: uso de aprendizaje automático para imputación de datos, detección de anomalías WIM y metamodelos de sustitución, con gobernanza que preserve la trazabilidad físico–mecánica.

Cierre. El enfoque M–E es, ante todo, una forma de pensar el activo vial como sistema físico sometido a cargas y ambientes variables, cuyo desempeño puede predecirse, verificarse y mejorar. Si esta obra contribuye a consolidar esa cultura técnica —y a diseñar pavimentos más seguros, durables y sostenibles—, su propósito estará cumplido.

Apéndice

A.1. Ensayo de Módulo Dinámico: AASHTO T-342

A.1.1. Objeto y campo de aplicación

La norma American Association of State Highway and Transportation Officials (2020), (AASHTO T-342) titulada “*Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt (HMA)*”, establece el procedimiento para determinar el módulo dinámico $|E^*|$ y el ángulo de fase δ de mezclas asfálticas compactadas, sometidas a carga axial sinusoidal sin confinamiento lateral.

Este parámetro es fundamental en el diseño mecanístico-empírico de pavimentos flexibles, al caracterizar el comportamiento visco-elástico lineal de las mezclas asfálticas frente a sollicitaciones repetidas.

A.1.2. Fundamento del ensayo

El ensayo aplica una carga axial cíclica de forma sinusoidal a una probeta cilíndrica de mezcla asfáltica, midiendo su respuesta deformacional axial. El módulo dinámico complejo se define como:

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = |E^*|e^{i\delta} \quad (\text{A.1})$$

donde:

E^* : Módulo dinámico complejo [MPa]

σ_0 : Amplitud del esfuerzo axial aplicado [MPa]

ε_0 : Amplitud de la deformación axial inducida [sin unidades]

δ : Ángulo de fase entre carga y deformación [°]

El módulo $|E^*|$ representa la rigidez global del material, mientras que δ refleja su comportamiento visco-elástico.

A.1.3. Equipos requeridos

- Sistema de carga axial dinámica (servo-hidráulico o electromecánico)

- Cámara climática con control de temperatura (4 °C a 55 °C)
- LVDTs montados directamente sobre la probeta
- Celdas de carga calibradas

A.1.4. Preparación de las probetas

Las probetas deben ser cilíndricas, de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura, compactadas mediante el compactador giratorio Superpave (SGC) o extraídas como núcleos de campo. Las caras deben ser planas y paralelas, para asegurar contacto adecuado con los platos de carga.

A.1.5. Condiciones de ensayo

El módulo dinámico se evalúa bajo diferentes combinaciones de temperatura y frecuencia, conforme al siguiente cuadro:

Cuadro A.1: Condiciones típicas de frecuencia y temperatura en el ensayo

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]
4	0.1 – 25
20	0.1 – 25
40	0.1 – 10
54.4	0.1 – 5

Los resultados se ajustan a un modelo sigmoïdal para construir el diagrama maestro de módulo dinámico:

$$\log_{10}(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp[\beta + \gamma \cdot \log_{10}(\tau)]} \quad (\text{A.2})$$

donde:

$|E^*|$: Módulo dinámico [MPa]

τ : Tiempo reducido [s], función de la frecuencia ajustada a una temperatura de referencia

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: Coeficientes de ajuste

A.1.6. Criterios de validez

- Deformación inducida: 75 a 125 microstrain
- Error relativo de carga: menor al 5 %
- Ángulo de fase: típicamente entre 5° y 45°
- Mínimo tres repeticiones válidas por condición

A.1.7. Resultados y representación gráfica

El resultado principal es el módulo dinámico $|E^*|$ en función de la frecuencia reducida, el cual se representa gráficamente mediante el diagrama maestro. Este se construye superponiendo las curvas obtenidas a distintas temperaturas, ajustadas mediante el principio de superposición de tiempos.

A.1.8. Aplicaciones en el diseño mecánico-empírico

- Modelado visco-elástico en análisis estructural multicapa
- Predicción del comportamiento por fatiga y deformación permanente
- Comparación de desempeño entre diferentes formulaciones de mezcla

A.2. Ensayo de Módulo Resiliente de Suelos y Agregados: AASHTO T 307

A.2.1. Objeto y campo de aplicación

La norma American Association of State Highway and Transportation Officials (2023) (AASHTO T 307-99 R2023), titulada “*Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*”, establece el procedimiento para determinar el módulo resiliente (M_r) de materiales utilizados en subrasante, subbase y base de pavimentos mediante un ensayo triaxial con carga cíclica.

A.2.2. Fundamento teórico

El módulo resiliente caracteriza el comportamiento elástico recuperable del suelo bajo cargas dinámicas. Se define como:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (\text{A.3})$$

donde:

M_r : módulo resiliente [MPa]

σ_d : esfuerzo desviador aplicado ($\sigma_1 - \sigma_3$) [MPa]

ε_r : deformación axial recuperable [sin unidad]

A.2.3. Preparación de la muestra

- Diámetro: 71.1 mm; Altura: 150 mm
- Compactación en capas o recuperación de muestras inalteradas
- Encamisado con membrana de látex y montaje en celda triaxial
- Saturación según tipo de suelo y condición de campo simulada

A.2.4. Equipamiento requerido

- Sistema triaxial con aplicación de carga repetida

- LVDTs de alta precisión para medición de deformación axial
- Celda triaxial con control de presión de confinamiento
- Sistema de adquisición de datos

A.2.5. Procedimiento de carga

Cada secuencia de carga consiste en:

- Presión de confinamiento: σ_3
- Esfuerzo desviador repetido: σ_d
- Forma de carga: semisinusoidal
- Duración: 0.1 s de carga y 0.9 s de reposo por ciclo

Se aplican 15 secuencias distintas de carga, representativas de condiciones reales de tránsito.

A.2.6. Tabla de secuencias estándar

Cuadro A.2: Secuencias de carga típicas según AASHTO T 307

Secuencia	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)
1	20	6
2	20	13
3	20	27
4	41	13
5	41	27
6	41	41
7	83	13
8	83	27
9	83	41
10	103	13
11	103	27
12	103	41
13	138	41
14	172	41
15	207	103

A.2.7. Modelos constitutivos

a) Modelo $K-\theta$.

$$M_r = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (\text{A.4})$$

b) Modelo de Witczak-Uzan (MEPDG).

$$M_r = k_1 \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (\text{A.5})$$

donde:

$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$: esfuerzo de confinamiento total [kPa]

P_a : presión atmosférica de referencia (≈ 101.3 kPa)

k_1, k_2, k_3 : parámetros de ajuste obtenidos por regresión

A.2.8. Criterios de validez

- Deformación plástica acumulada debe ser mínima
- Variación del módulo en los ciclos finales: $< 10\%$
- Probetas sin colapso o falla estructural
- Al menos 3 muestras por tipo de suelo

A.2.9. Aplicaciones

- Modelado elástico no lineal de capas no tratadas
- Evaluación de la calidad estructural de subrasantes y capas granulares
- Ajuste del diseño de espesores en función del comportamiento mecánico real

A.3. Norma ASTM D1194: Ensayo de capacidad portante de suelos bajo cargas estáticas

La norma ASTM International (2003) establece el método de ensayo para determinar la *capacidad portante de suelos bajo cargas estáticas* aplicadas mediante zapatas de gran superficie o placas de carga rígidas. Este procedimiento permite evaluar la resistencia del suelo, los asentamientos asociados y el módulo de reacción de la subrasante, parámetros fundamentales para el diseño de pavimentos rígidos y cimentaciones superficiales.

A.3.1. Objeto y campo de aplicación

El ensayo se utiliza para:

- Determinar la capacidad portante última (q_{ult}) del suelo.
- Estimar la capacidad de carga admisible (q_{adm}) mediante factores de seguridad.
- Obtener el módulo de reacción del suelo (k), empleado en el diseño mecanístico-empírico de losas de concreto.
- Evaluar la respuesta del terreno bajo cargas distribuidas similares a zapatas o losas de pavimento.

A.3.2. Materiales y equipos

- *Placa de carga o zapata de ensayo*: de acero rígido, circular o cuadrada, con dimensiones típicas entre 0.76 m y 1.5 m.
- *Sistema de reacción*: vigas de reacción, contrapesos o vehículos pesados para resistir la carga aplicada.
- *Gato hidráulico*: con capacidad suficiente para aplicar cargas crecientes y controladas.
- *Celda de carga o manómetro*: para medir la presión aplicada con precisión.
- *Deformímetros o extensómetros*: para registrar asentamientos verticales, con precisión mínima de 0.01 mm.
- *Instrumentación auxiliar*: bases de apoyo, nivel óptico o estación total para control geométrico.

A.3.3. Procedimiento de ensayo

1. Preparar y nivelar la superficie del terreno natural donde se colocará la placa de carga.
2. Colocar la placa metálica o zapata de ensayo en contacto directo con el terreno.
3. Instalar el sistema de reacción y el gato hidráulico en posición vertical sobre la placa.
4. Aplicar la carga en incrementos del 5–10 % de la carga estimada de falla.
5. Mantener cada incremento de carga hasta que el asentamiento se estabilice (variación menor a 0.02 mm en 10 minutos).
6. Registrar la carga aplicada (q) y el asentamiento (Δ) en cada etapa.
7. Continuar el proceso hasta la falla del suelo o hasta alcanzar asentamientos predeterminados (5–10 % del diámetro de la placa).

A.3.4. Cálculo de parámetros

Capacidad portante última.

$$q_{ult} = \frac{P_{falla}}{A} \quad (A.6)$$

donde:

q_{ult} : capacidad portante última (MPa).

P_{falla} : carga total aplicada en el momento de falla (kN).

A : área de la placa o zapata de ensayo (m²).

Capacidad admisible.

$$q_{adm} = \frac{q_{ult}}{FS} \quad (A.7)$$

donde:

q_{adm} : capacidad portante admisible (MPa).

q_{ult} : capacidad portante última (MPa).

FS : factor de seguridad (generalmente entre 2 y 3).

Módulo de reacción de la subrasante.

$$k = \frac{q}{\Delta} \quad (\text{A.8})$$

donde:

k : módulo de reacción de la subrasante (MPa/m).

q : presión aplicada sobre la losa (MPa).

Δ : asentamiento vertical correspondiente (m).

A.3.5. Resultados e interpretación

Los resultados del ensayo se expresan en una curva carga–asentamiento ($q-\Delta$), que permite identificar:

- La zona inicial elástica, empleada para calcular el módulo de reacción k .
- La zona plástica, donde los asentamientos aumentan con pequeños incrementos de carga.
- El punto de falla del suelo, que define q_{ult} .

A.3.6. Aplicación en pavimentos rígidos

En el diseño de losas de concreto:

- El valor de k se utiliza en las ecuaciones de Westergaard y en el MEPDG.
- La curva carga–asentamiento permite evaluar la respuesta de la subrasante frente a cargas repetidas.
- El ensayo ayuda a calibrar modelos empíricos (CBR, R-value) con resultados de campo más realistas.

A.3.7. Limitaciones

- Es un ensayo costoso y de difícil ejecución por el tamaño de la placa y el sistema de reacción requerido.
- Los resultados son sensibles al contenido de humedad y varían estacionalmente.
- No es representativo en suelos heterogéneos o con gravas de gran tamaño.

A.3.8. Relevancia en el enfoque mecanístico-empírico

El uso de la ASTM D1194 en el método M-E permite:

- Incorporar valores medidos del módulo de reacción en el diseño de losas.
- Considerar la variabilidad de la subrasante en condiciones reales de carga y humedad.
- Reducir la incertidumbre frente a correlaciones empíricas, mejorando la confiabilidad del diseño estructural.

A.4. Modelo de Burmister para Sistemas Multicapa

A.4.1. Introducción

El modelo de Burmister, desarrollado en "*The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways*" (Burmister, 1943) y en "*The general theory of stresses and displacements in layered systems*" (Burmister, 1945), representa una generalización de la teoría de Boussinesq para medios multicapa. Considera una carga circular uniformemente distribuida sobre una estructura compuesta por capas elásticas, horizontales e isotrópicas, perfectamente adheridas entre sí, siendo la última capa semi-infinita. Este modelo permitió por primera vez incorporar de forma sistemática el efecto de rigideces diferenciadas en el análisis estructural de pavimentos flexibles.

A.4.2. Supuestos Fundamentales

- Cada capa es homogénea, isotrópica y elástica lineal.
- Las interfaces entre capas son perfectamente adheridas (sin deslizamiento).
- La carga aplicada es circular y de presión uniforme.
- La capa inferior (subrasante) se modela como un medio semiinfinito.

A.4.3. Deflexión para Estructura Bicapa

Sea una estructura de dos capas con:

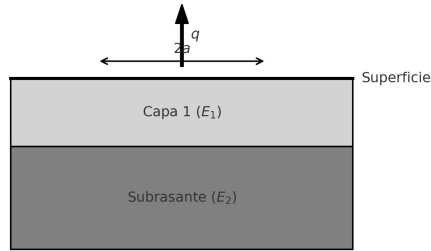
E_1, ν_1 : módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson de la capa superior (espesor h),

E_2, ν_2 : módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson de la subrasante (semiespacio),

q : presión aplicada sobre un círculo de radio a .

La deflexión vertical en el centro de la carga se expresa como:

$$\delta = \frac{qa}{E_2} \cdot F_d \quad (\text{A.9})$$

Figura A.1: *Modelo de Burmister*

donde:

δ : deflexión vertical,

F_d : factor de influencia determinado en función de h/a y E_1/E_2 , tabulado por Burmister.

A.4.4. Distribución de Esfuerzos en la Interface

La tensión vertical en la interfaz entre la capa 1 y la subrasante es:

$$\sigma_z = q \cdot F_\sigma \quad (\text{A.10})$$

donde F_σ es un coeficiente también dependiente de la rigidez y espesor relativo de las capas.

A.4.5. Extensión a Tres o Más Capas

Para estructuras de tres o más capas, el modelo original de Burmister se extiende utilizando formulaciones numéricas. Estas requieren satisfacer condiciones de compatibilidad y equilibrio entre capas. Programas como *KEN-LAYER*, *ELSYM5* y *WESLEA* aplican este principio.

A.4.6. Aplicación en Diseño M-E

El modelo de Burmister proporciona la base para el cálculo de esfuerzos y deformaciones utilizados como respuesta estructural en el diseño mecanístico-empírico.

A.4.7. Limitaciones

- No incorpora efectos visco-elásticos ni plásticos.
- No modela el comportamiento a largo plazo ni la variación ambiental.
- Las condiciones ideales de carga y contacto pueden alejarse de la realidad del tránsito.

A.5. Método de los Elementos Finitos (FEM) aplicado a la Teoría Multicapa

A.5.1. Introducción General

El Método de los Elementos Finitos (FEM) es una herramienta numérica que permite resolver con alta precisión problemas de deformación y esfuerzo en medios complejos. En pavimentos, permite modelar sistemas multicapa sometidos a cargas móviles con condiciones realistas, materiales heterogéneos y geometría no ideal.

El Método de los Elementos Finitos ha sido ampliamente formalizado y desarrollado por Zienkiewicz y Taylor (2005), convirtiéndose en una de las herramientas computacionales más versátiles en análisis estructural y geotécnico.

La formulación general del FEM en problemas elásticos isotrópicos se puede encontrar detalladamente en Hughes (2000), incluyendo tanto análisis estático como dinámico.

En ingeniería de pavimentos, el trabajo de Huang (2004) constituye una referencia esencial al integrar modelos multicapa y procedimientos de análisis estructural mediante FEM axisimétrico.

La AASHTO (2008) permite la incorporación de modelos estructurales avanzados, incluyendo análisis por elementos finitos, como parte del diseño mecanístico-empírico de pavimentos

A.5.2. Fundamentos Matemáticos del FEM

Ecuación de equilibrio.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (\text{A.11})$$

donde:

$\boldsymbol{\sigma}$ Tensor de esfuerzos de Cauchy [Pa].

\mathbf{f} Vector de fuerzas de cuerpo por unidad de volumen [N/m³].

Ley constitutiva (Hooke).

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (\text{A.12})$$

donde:

D Matriz constitutiva del material elástico lineal (depende de E y ν).

$\boldsymbol{\varepsilon}$ Tensor (vectorizado) de deformaciones de ingeniería [-].

Relación deformación–desplazamiento.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (\text{A.13})$$

donde:

B Matriz de deformación–desplazamiento del elemento finito.

u Vector de desplazamientos nodales [m].

Sistema de ecuaciones global.

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F}, \quad \mathbf{K} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \quad (\text{A.14})$$

donde:

K Matriz global de rigidez [N/m].

F Vector global de fuerzas nodales [N].

V Volumen del dominio del problema [m³].

A.5.3. Modelado axisimétrico para pavimentos

Cuando la carga es circular, es eficiente emplear un modelo axisimétrico. La formulación reduce el análisis tridimensional a un problema bidimensional con simetría alrededor del eje vertical.

Matriz constitutiva axisimétrica (material elástico).

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

donde:

E Módulo de Young [Pa].

ν Coeficiente de Poisson [-].

$(\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta, \tau_{rz})$ Esfuerzos en coordenadas cilíndricas [Pa].

$(\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \gamma_{rz})$ Deformaciones correspondientes [-].

A.5.4. Aplicaciones del FEM en Pavimentos

- Cálculo de esfuerzos y deformaciones en capas con materiales no homogéneos.
- Modelado de cargas móviles y secuencias de carga realistas.
- Evaluación de condiciones térmicas y efectos estacionales.
- Análisis de daño por fatiga o deformación permanente.

Cuadro A.3: Comparación FEM vs. Modelos Analíticos

Característica	Modelo Burmister	FEM
Geometría irregular	No	Sí
Módulo variable con profundidad	No	Sí
Cargas móviles/múltiples	No	Sí
Materiales no lineales	No	Sí
Modelado térmico	No	Sí

A.5.5. Software que implementa FEM en Pavimentos

- *ABAQUS*: análisis tridimensional avanzado.
- *ANSYS*: simulaciones estructurales complejas.
- *EverFE*: específico para pavimentos rígidos.
- *ISLAB2000*: pavimentos de losas de concreto.
- *KENLAYER*, *WESLEA*: combinaciones analíticas y FEM.

A.5.6. Consideraciones Numéricas

- Mallado refinado bajo el área de carga.
- Condiciones de frontera no reflectivas.
- Elementos tipo hexaedro para 3D o cuadrilátero para axisimétrico.
- Análisis acoplado mecánico-térmico si se requiere.

A.5.7. Conclusiones

El método FEM supera las limitaciones de los modelos analíticos tradicionales. Es esencial para el análisis y diseño moderno de pavimentos mecanístico-empíricos, ya que permite representar fielmente las condiciones estructurales, ambientales y de carga.

A.6. Teoría de Placas Delgadas

A.6.1. Introducción

Esta teoría permite modelar el comportamiento de elementos bidimensionales de espesor relativamente pequeño sometidos a cargas perpendiculares a su superficie media, describiendo su flexión, deformación y esfuerzos internos.

A.6.2. Supuestos Básicos de la Teoría de Kirchhoff-Love

Los fundamentos de la teoría clásica de placas, formulada por Kirchhoff y formalizada por Timoshenko y Woinowsky-Krieger (1959), se basan en:

- La placa es homogénea, isótropa y elástica.
- El espesor h es mucho menor que las otras dimensiones: $h \ll L$.
- Las deformaciones normales a la superficie media son despreciables.
- Las secciones normales al plano medio permanecen normales después de la deformación (no hay deformación por cortante transversal).

A.6.3. Descripción Geométrica y Cinemática

En un sistema cartesiano (x, y, z) , la placa se ubica inicialmente en el plano medio $z = 0$, con espesor h . La variable principal es la deflexión transversal $w(x, y)$, normal al plano medio (Reddy, 2006).

A.6.4. Rigidez flexural

$$D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (\text{A.16})$$

donde:

D Rigidez flexural de la placa [N·m].

E Módulo de elasticidad [Pa].

ν Coeficiente de Poisson [-].

h Espesor de la placa [m].

A.6.5. Ecuación diferencial de equilibrio

$$D \nabla^4 w(x, y) = q(x, y) \quad (\text{A.17})$$

donde:

$w(x, y)$ Deflexión transversal [m].

$q(x, y)$ Carga distribuida por unidad de área [N/m²].

∇^4 Operador biarmónico.

El operador biarmónico se define como:

$$\nabla^4 \equiv \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \quad (\text{A.18})$$

A.6.6. Momentos flectores y esfuerzos

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (\text{A.19})$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (\text{A.20})$$

$$M_{xy} = -D (1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (\text{A.21})$$

donde:

M_x, M_y, M_{xy} Momentos flectores por unidad de longitud en la placa [N·m/m].

Los esfuerzos normales a una distancia z del plano medio son:

$$\sigma_x = \frac{12 M_x z}{h^3}, \quad \sigma_y = \frac{12 M_y z}{h^3} \quad (\text{A.22})$$

donde:

σ_x, σ_y Esfuerzos normales [Pa].

z Distancia a la fibra respecto del plano medio (positiva hacia $+z$) [m].

A.6.7. Condiciones de borde

Apoyo simple: $w = 0, M = 0$

Empotrado: $w = 0, \frac{\partial w}{\partial n} = 0$

Libre: $M = 0, Q = 0$

donde: M es el momento resultante por unidad de longitud y Q el esfuerzo cortante transversal resultante; n denota la dirección normal al borde.

A.6.8. Aplicación a pavimentos rígidos (fundación de Winkler)

$$q(x, y) = k w(x, y) \quad (\text{A.23})$$

donde:

k Módulo de reacción de la fundación de Winkler [N/m^3].

La ecuación estructural completa queda:

$$D \nabla^4 w(x, y) + k w(x, y) = q(x, y) \quad (\text{A.24})$$

Este modelo se utiliza ampliamente en el diseño M-E para analizar losas sometidas a cargas repetidas. (AASHTO, 2008)

A.6.9. Soluciones Clásicas

Westergaard (1926) resolvió estas ecuaciones para casos de carga puntual en centro, borde y esquina de losas sobre cimiento elástico.

A.6.10. Limitaciones y Extensiones

Para placas más gruesas o condiciones complejas se emplean:

- Teoría de Reissner-Mindlin (incluye efectos de cortante).
- Modelos de Elementos Finitos (FEM).
- Modelos visco-elásticos dependientes del tiempo.

A.6.11. Conclusión

La teoría de placas delgadas es una herramienta esencial para el análisis estructural de pavimentos rígidos. Su formulación matemática rigurosa y su aplicabilidad a condiciones reales, la convierten en un componente crítico del diseño mecánico-empírico moderno.

A.7. Modos de deterioro estructural en pavimentos flexibles

El deterioro estructural de un pavimento flexible bajo el enfoque M-E se entiende como la acumulación progresiva de daño en las capas que lo conforman, debido a la repetición de cargas de tránsito y a la acción del clima. Los principales mecanismos se describen a continuación.

A.7.1. Fisuración por fatiga de la carpeta asfáltica

La fisuración por fatiga constituye uno de los modos de deterioro más representativos y críticos en pavimentos flexibles. Se define como la formación y propagación progresiva de microfisuras en la mezcla asfáltica, inducidas por la repetición de cargas de tránsito, hasta que estas coalescen y forman una red de grietas interconectadas que compromete la capacidad estructural y la funcionalidad del pavimento. Los principales indicadores de desempeño son el porcentaje de área cuarteada, longitud de grietas y severidad de las mismas.

En términos mecanicistas, la fisuración por fatiga es la respuesta acumulativa del material frente a deformaciones de tracción cíclicas localizadas principalmente en la fibra inferior de la carpeta asfáltica, mientras que desde el punto de vista empírico se interpreta como una pérdida de vida útil al alcanzarse un umbral de daño acumulado.

En la actualidad se han desarrollado algoritmos avanzados para modelar la reducción del módulo de elasticidad del asfalto a medida que progresa el daño por fatiga, mejorando la predicción de fallas estructurales. (Kamalizadeh et al., 2022)

Fisuración bottom-up. Se inicia en la base de la mezcla asfáltica, bajo la huella de carga, donde se concentran las tensiones de tracción. Con el paso repetido de ejes, se generan microfisuras que coalescen y se propagan hacia la superficie, formando el clásico agrietamiento en “piel de cocodrilo”.

Fisuración top-down. Se inicia en la superficie de la carpeta debido a tensiones de tracción superficiales, inducidas por gradientes térmicos, rigidez elevada por envejecimiento y concentraciones de esfuerzo en la huella del

neumático. Se manifiesta en forma de grietas longitudinales que luego se ramifican transversalmente.

Enfoque mecanístico. En el método M-E, el análisis parte del cálculo de las deformaciones horizontales de tracción en la base de la carpeta asfáltica (ε_t) y de las deflexiones verticales en la superficie de la subrasante (ε_v). Estas magnitudes se determinan mediante modelos multicapa elásticos o de elementos finitos, considerando:

- Propiedades dinámicas de la mezcla asfáltica: módulo dinámico (E^*), relación de Poisson y comportamiento viscoelástico.
- Propiedades de las capas granulares y la subrasante: módulo resiliente y coeficiente de reacción.
- Carga aplicada: magnitud, duración del pulso de carga y espectro de ejes equivalentes.
- Condiciones climáticas: temperatura y humedad, que modifican el módulo dinámico de la mezcla.

Enfoque empírico. Históricamente, la relación empírica de fatiga se ha expresado en forma de ecuaciones de tipo potencia, obtenidas de ensayos de laboratorio (p. ej., *beam fatigue test*, *four-point bending*). Una expresión generalizada es:

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{1}{E^*}\right)^{k_3} \quad (\text{A.25})$$

donde:

N_f : número de repeticiones hasta la falla por fatiga.

ε_t : deformación de tracción en la base de la carpeta asfáltica (adimensional).

E^* : módulo dinámico de la mezcla asfáltica (MPa).

k_1, k_2, k_3 : coeficientes empíricos, dependientes del tipo de mezcla y de las condiciones de ensayo.

Integración mecanístico-empírica. El enfoque M-E integra el cálculo mecanicista de tensiones y deformaciones con la predicción empírica de vida a fatiga. El proceso se desarrolla en dos fases:

1. Iniciación de fisuras: determinada por la acumulación de microdaños en la fibra inferior de la carpeta.
2. Propagación de fisuras: modelada mediante leyes de crecimiento de grieta (p. ej., ley de París) hasta alcanzar una densidad crítica de agrietamiento superficial.

El daño acumulado se evalúa con el criterio de Miner modificado:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (\text{A.26})$$

donde:

D : daño acumulado (adimensional).

n_i : número de repeticiones de carga aplicadas en el intervalo i .

N_{fi} : número de repeticiones hasta la falla por fatiga para el intervalo i .

n : número total de intervalos de carga considerados.

La condición de falla se cumple cuando $D \geq 1.0$.

Factores determinantes. El desempeño frente a fatiga está influenciado por:

- Materiales: tipo de ligante, contenido de asfalto, gradación, vacíos de aire y aditivos modificadores.
- Espesor estructural: mayores espesores reducen las deformaciones críticas de tracción.
- Tráfico: magnitud, frecuencia y espectro de ejes equivalentes.
- Clima: la temperatura modifica la rigidez y la susceptibilidad al agrietamiento.
- Velocidad de carga: menores velocidades aumentan la duración del pulso de carga y la deformación resultante.

Implicancias en el diseño M-E. La predicción de la fisuración por fatiga permite:

- Definir espesores óptimos de carpeta que minimicen deformaciones críticas.
- Seleccionar mezclas asfálticas con mayor resistencia a fatiga (e.g., modificadas con polímeros).
- Evaluar la confiabilidad del diseño considerando variabilidad de materiales, tránsito y clima.
- Establecer estrategias de mantenimiento y rehabilitación basadas en umbrales de daño acumulado.

A.7.2. Deformación permanente (ahuellamiento o rutting)

La deformación permanente, también denominada ahuellamiento o *rutting*, corresponde al deterioro caracterizado por la formación de surcos longitudinales en las huellas de rodada de los vehículos. Este daño reduce la seguridad (incremento del riesgo de hidropilaje, pérdida de comodidad de marcha) y la durabilidad del pavimento.

Desde un punto de vista estructural, el rutting es consecuencia de la acumulación de deformaciones plásticas irreversibles en las distintas capas del pavimento (mezcla asfáltica, base, subbase y subrasante). Aunque visualmente se manifiesta en la superficie, puede originarse y acumularse en cualquier estrato del sistema multicapa.

Enfoque mecanístico. En el enfoque mecanicista, el ahuellamiento se estudia a partir de las tensiones y deformaciones verticales inducidas por la carga de tránsito, considerando que cada capa presenta una capacidad limitada de soportar deformaciones plásticas acumuladas.

- En la carpeta asfáltica, el rutting está asociado a fenómenos de fluencia viscoplástica y *creep* bajo altas temperaturas y cargas repetidas.
- En las capas granulares y la subrasante, se asocia a la acumulación de deformaciones plásticas residuales cuando el esfuerzo cortante excede la resistencia al corte del material.

Enfoque empírico. El tratamiento empírico del rutting se ha basado en correlaciones experimentales obtenidas en ensayos acelerados de carga o pistas de prueba. Los modelos empíricos relacionan el número de repeticiones de carga (N) con la profundidad acumulada de huella (r):

$$r = k_1 \cdot N^{k_2} \quad (\text{A.27})$$

donde:

r : profundidad acumulada de huella (mm).

N : número de repeticiones de carga.

k_1, k_2 : constantes empíricas dependientes de las propiedades del material y de las condiciones ambientales.

Integración mecanístico-empírica. El enfoque M-E combina el análisis mecanicista con modelos empíricos calibrados a condiciones de campo. La deformación permanente total en la superficie se calcula como la suma de las contribuciones de cada capa:

$$r_{total} = \sum_{j=1}^m r_j \quad (\text{A.28})$$

donde:

r_{total} : profundidad total de huella (mm).

r_j : deformación permanente acumulada en la capa j .

m : número de capas del pavimento.

En la carpeta asfáltica, el método M-E utiliza modelos viscoplásticos ajustados por temperatura y velocidad de carga. Para las capas no ligadas y la subrasante, se aplican modelos de deformación plástica acumulada en función del esfuerzo cortante y del módulo resiliente.

Factores determinantes. El desarrollo del rutting está condicionado por múltiples factores:

- Materiales: propiedades reológicas del ligante asfáltico, resistencia al corte de capas granulares y subrasante.
- Clima: temperaturas elevadas favorecen la fluencia en mezclas asfálticas y la humedad reduce la resistencia de la subrasante.
- Tráfico: magnitud, frecuencia y espectro de cargas pesadas; velocidad de tránsito.
- Estructura del pavimento: espesores de capa y distribución de tensiones en profundidad.

Implicancias en el diseño M-E. El control del rutting es una condición crítica en el diseño M-E. Sus implicancias incluyen:

- Dimensionar espesores adecuados para minimizar deformaciones verticales críticas.
- Seleccionar mezclas asfálticas con menor susceptibilidad térmica.
- Mejorar la capacidad portante de capas granulares y subrasante mediante estabilización.
- Definir criterios de confiabilidad que consideren la variabilidad de materiales, clima y tránsito.
- Establecer límites de profundidad máxima admisible de huella (usualmente 12–15 mm).

A.7.3. Fisuración térmica transversal por contracción

La fisuración térmica transversal es un deterioro caracterizado por la aparición de grietas perpendiculares al eje de la vía, distribuidas regularmente a lo largo del pavimento flexible. Este daño está asociado principalmente a tensiones de tracción inducidas por la contracción térmica de la mezcla asfáltica cuando se producen descensos de temperatura, especialmente en zonas con amplitudes térmicas significativas y ciclos de congelamiento-deshielo.

A diferencia de la fisuración por fatiga, que depende de la repetición de cargas, la fisuración térmica responde de manera más directa a las propiedades reológicas y térmicas de la mezcla asfáltica, al gradiente de temperatura

y al grado de restricción al movimiento generado por las capas subyacentes.

En climas fríos o en zonas altoandinas, la mezcla asfáltica experimenta contracciones térmicas que generan tensiones internas superiores a su resistencia a la tracción. Cuando la tensión térmica supera la resistencia de la HMA, se produce la aparición de grietas transversales, las cuales se conocen como fisuración térmica.

Enfoque mecanístico. En el análisis mecanicista, la fisuración térmica se modela como el resultado de la contracción restringida de la capa asfáltica cuando experimenta descensos de temperatura. La tensión de tracción inducida (σ_T) se expresa como:

$$\sigma_T = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (\text{A.29})$$

donde:

σ_T : tensión térmica de tracción inducida (MPa).

E : módulo elástico o dinámico de la mezcla asfáltica (MPa).

α : coeficiente de expansión/constricción térmica lineal de la mezcla (1/°C).

ΔT : variación de temperatura respecto al estado inicial (°C).

Cuando σ_T supera la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica (evaluada en ensayos *Indirect Tensile Strength, ITS*), se inicia la fisuración transversal.

Enfoque empírico. La susceptibilidad a la fisuración térmica se evalúa mediante ensayos de laboratorio, como el *Thermal Stress Restrained Specimen Test* (TSRST) o el *Indirect Tensile Test* (IDT), que permiten determinar:

- Temperatura crítica de fractura (T_{cr}): temperatura mínima a la cual la mezcla pierde cohesión.
- Velocidad de generación de tensiones térmicas: asociada a la tasa de enfriamiento.

Los modelos empíricos relacionan estas propiedades con la vida útil del pavimento, estableciendo el número de ciclos de enfriamiento que una mezcla puede soportar antes de presentar fisuración visible.

Integración mecanístico-empírica. El enfoque M-E aborda la fisuración térmica mediante modelos que integran:

1. Cálculo mecanicista de tensiones térmicas en función del módulo dinámico, el coeficiente de dilatación y el historial de temperatura.
2. Comparación empírica con propiedades de resistencia determinadas en laboratorio, como T_{cr} , el módulo de relajación y la resistencia a tracción.
3. Predicción de densidad de grietas transversales a lo largo del tiempo, considerando la acumulación de ciclos térmicos críticos.

El deterioro se expresa como número de grietas por kilómetro o como porcentaje del área agrietada en superficie.

Factores determinantes. Los factores que condicionan la fisuración térmica transversal son:

- Propiedades del ligante asfáltico: grado de desempeño PG y susceptibilidad al envejecimiento.
- Propiedades de la mezcla: módulo dinámico a bajas temperaturas, contenido de ligante, vacíos de aire y uso de modificadores.
- Clima: amplitud térmica diaria y estacional, número de ciclos de congelamiento-deshielo.
- Condiciones estructurales: espesor de la carpeta y rigidez de las capas subyacentes.

Implicancias en el diseño M-E. El control de la fisuración térmica requiere:

- Selección del ligante asfáltico apropiado según el grado de desempeño PG.
- Optimización de la mezcla asfáltica para reducir vacíos y mejorar cohesión interna.
- Incorporación de aditivos modificadores para incrementar la flexibilidad a bajas temperaturas.

- Uso de modelos de predicción calibrados localmente, que reproduzcan la respuesta térmica real del pavimento.

A.7.4. Reflexión de fisuras en recapado (overlays)

La reflexión de fisuras constituye uno de los modos de deterioro más críticos y recurrentes en pavimentos flexibles cuando se aplica un recapado (overlay) sobre una superficie envejecida o deteriorada. Desde la perspectiva mecanicista-empírica, este fenómeno no se aborda únicamente como un proceso superficial, sino como la transferencia y amplificación de esfuerzos y deformaciones generados en el sistema multicapa, los cuales se manifiestan en la capa de refuerzo asfáltico hasta producir la propagación de las discontinuidades preexistentes.

La reflexión de fisuras es consecuencia de la combinación de tres mecanismos principales, que interactúan en función de las condiciones estructurales y de servicio del pavimento:

- Movimientos de contracción y expansión térmica de la base fisurada, que inducen deformaciones cíclicas de tracción y compresión en el recubrimiento asfáltico.
- Movimientos inducidos por carga de tráfico (deflexiones verticales y desplazamientos horizontales en la zona de la fisura), que transmiten tensiones de tracción en el overlay.
- Fatiga del material del recubrimiento, derivada de la repetición de micro-fisuras y la concentración de esfuerzos en el plano de discontinuidad.

En el enfoque M-E, la reflexión se analiza considerando que las fisuras originales actúan como puntos singulares de concentración de esfuerzos, generando deformaciones horizontales en la fibra inferior del recapado. La reflexión de fisuras no se evalúa con un único modelo universal, sino a través de aproximaciones que consideran los mecanismos predominantes en la propagación de discontinuidades:

Modelos basados en deformaciones de tracción Estos modelos relacionan la deformación de tracción en la base del recapado (ε_t) con la resistencia a

fatiga del material mediante leyes empíricas de fatiga, expresadas en función del número de repeticiones de carga N_f :

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{k_3} \quad (\text{A.30})$$

donde:

N_f : número de repeticiones de carga hasta la falla por fatiga.

ε_t : deformación de tracción en la base del overlay (adimensional).

E : módulo dinámico de la mezcla asfáltica (MPa).

k_1, k_2, k_3 : coeficientes empíricos determinados por calibración.

Modelos de propagación de grieta El análisis mecanicista puede incorporar la mecánica de fractura, donde la velocidad de propagación de la grieta se expresa mediante la ley de París:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (\text{A.31})$$

donde:

$\frac{da}{dN}$: tasa de propagación de la grieta por ciclo (m/ciclo).

ΔK : rango del factor de intensidad de esfuerzos ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$).

C, m : constantes empíricas del material obtenidas por ensayos de fatiga.

a : longitud de la grieta (m).

N : número de ciclos de carga aplicados.

Modelos mixtos mecanístico-empíricos Los modelos implementados en guías como el *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) integran la teoría de elasticidad multicapa o de elementos finitos con ecuaciones empíricas calibradas a condiciones locales. Estos modelos consideran la iniciación y propagación de fisuras, así como la acumulación de daño por repetición de cargas, mediante el uso del criterio de Miner modificado.

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (\text{A.32})$$

donde:

D : daño acumulado (adimensional).

n_i : número de repeticiones de carga aplicadas en el nivel i .

N_{fi} : número de repeticiones hasta la falla por fatiga para el nivel i .

n : número total de intervalos de carga considerados.

Factores condicionantes La severidad y la tasa de reflexión de fisuras dependen de múltiples factores que deben incorporarse en el análisis mecanístico-empírico:

- Propiedades del overlay: módulo dinámico, espesor y resistencia a fatiga.
- Características de la fisura existente: ancho, extensión y tratamientos previos.
- Condiciones climáticas: gradientes térmicos, ciclos de congelación-deshielo.
- Nivel y tipo de tráfico: cargas pesadas repetidas y velocidades de aplicación.
- Tratamientos intermedios: uso de membranas antirreflexión o capas SAMI.

Implicancias en el diseño mecanístico-empírico En el diseño M-E de recapados, la reflexión de fisuras constituye un modo de falla limitante. Por ello, los modelos de predicción permiten:

- Estimar el tiempo hasta la iniciación de fisuras reflejadas.
- Determinar la tasa de propagación hasta niveles críticos de severidad.
- Optimizar el espesor del overlay y evaluar la necesidad de intervenciones preventivas (sellado, fresado parcial, capas intermedias).

A.7.5. Daño por humedad y pérdida de adhesión (stripping)

El *stripping* o daño por humedad corresponde al deterioro progresivo de un pavimento flexible debido a la pérdida de adhesión entre el ligante asfáltico y los agregados minerales en presencia de agua. Se manifiesta inicialmente en el nivel microscópico como separación interfacial y pérdida de cohesión, y posteriormente como fallas macroscópicas: ahuellamiento acelerado, desprendimiento de agregados, fisuración y deformaciones localizadas.

Este fenómeno está estrechamente ligado a la presencia y migración de agua dentro de la estructura del pavimento y a las propiedades físicoquímicas de los materiales, que determinan la afinidad asfalto-agregado.

Enfoque mecanístico. Desde el punto de vista mecanicista, el stripping se entiende como un proceso de debilitamiento de la resistencia a tracción indirecta y al corte de la mezcla asfáltica, inducido por la sustitución del ligante por el agua en la superficie de los agregados.

El análisis estructural incluye:

- Presión de poro inducida por cargas de tránsito: cuando el pavimento se encuentra saturado, las cargas repetidas generan presiones hidráulicas que favorecen la separación asfalto-agregado.
- Reducción del módulo dinámico (E^*) de la mezcla asfáltica bajo condiciones de humedad, lo que incrementa deformaciones críticas y acelera fallas por fatiga o ahuellamiento.
- Disminución de la resistencia al esfuerzo cortante en las capas granulares saturadas, lo que facilita deformaciones plásticas permanentes.

Enfoque empírico. Empíricamente, el stripping se evalúa mediante ensayos de laboratorio acelerados que cuantifican la pérdida de resistencia en presencia de agua:

- AASHTO T283 (Lottman modificado): mide la relación de resistencia a tracción indirecta en condiciones húmedas y secas, expresada como *Tensile Strength Ratio* (TSR).
- Hamburg Wheel Tracking Test (HWTT): evalúa simultáneamente susceptibilidad al ahuellamiento y daño por humedad bajo inmersión en agua y carga repetida.
- Ensayos de pelado estático y dinámico: miden la adhesión asfalto–agregado en condiciones de humedad.

Integración mecanístico-empírica. El enfoque M-E incorpora el stripping de forma indirecta, ajustando las propiedades mecánicas del pavimento bajo condiciones de humedad. El procedimiento general incluye:

- Reducción del módulo dinámico efectivo de la mezcla asfáltica (E_{hmedo}^*) en función del grado de saturación y de la pérdida de adhesión medida en laboratorio.
- Cálculo de nuevas deformaciones críticas ($\varepsilon_t, \varepsilon_v$) bajo las condiciones modificadas.
- Incremento en la tasa de daño acumulado por fatiga y ahuellamiento debido a la pérdida de adhesión.

El daño acumulado bajo condiciones de humedad se evalúa con el criterio de Miner modificado:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi, hmedo}} \quad (A.33)$$

donde:

D : daño acumulado (adimensional).

n_i : número de repeticiones de carga en el intervalo i .

$N_{fi, hmedo}$: número de repeticiones hasta la falla por fatiga en condición húmeda.

n : número de intervalos de carga considerados.

Factores determinantes. La susceptibilidad al stripping está influenciada por:

- Propiedades de los agregados: mineralogía, textura superficial y afinidad con el ligante.
- Propiedades del ligante asfáltico: grado PG, polaridad, uso de aditivos antistripping o modificadores.
- Contenido de vacíos de aire en la mezcla: altos vacíos favorecen la penetración de agua.
- Condiciones climáticas: precipitaciones intensas, ciclos de humedad-sequedad y congelamiento-deshielo.
- Condiciones de drenaje: ausencia de sistemas de evacuación de agua incrementa la presión de poros y acelera el stripping.

Implicancias en el diseño M-E. En el diseño mecanístico-empírico, el stripping se considera mediante:

- Selección de materiales resistentes a la humedad, verificados con ensayos de adhesión y TSR.
- Uso de aditivos antistripping (cal hidratada, aminas líquidas, polímeros) que mejoran la unión asfalto-agregado.
- Control de vacíos de aire mediante diseño volumétrico adecuado (Superpave).
- Diseño de drenaje efectivo, reduciendo la saturación prolongada en capas granulares y subrasante.
- Calibración local del método, incorporando factores de corrección por humedad en las propiedades dinámicas de las mezclas.

A.7.6. Interacciones entre mecanismos

En la práctica del diseño y gestión de pavimentos, los modos de deterioro rara vez ocurren de manera aislada. Existe un efecto sinérgico y acumulativo entre diferentes mecanismos de daño, lo cual acelera la degradación y reduce la vida útil respecto a la predicha por modelos independientes. El enfoque

mecanístico-empírico reconoce esta complejidad y busca representarla mediante la integración de modelos de daño interdependientes, calibrados con observaciones de campo.

Principales interacciones entre deterioros.

- *Fatiga y ahuellamiento*: la fisuración por fatiga facilita la infiltración de agua y la pérdida de soporte, lo que acelera el ahuellamiento; a su vez, los surcos concentran tensiones de tracción que favorecen la propagación de la fatiga.
- *Fatiga y stripping*: la pérdida de adhesión reduce la resistencia a tracción, disminuyendo significativamente el número de repeticiones a fatiga (N_f).
- *Rutting y fisuración térmica*: la deformación permanente concentra tensiones que favorecen el agrietamiento térmico, mientras que las grietas térmicas aumentan la permeabilidad y aceleran el rutting.
- *Fatiga y fisuración térmica*: las grietas térmicas actúan como puntos de concentración de esfuerzos que facilitan la propagación de fatiga, y el daño por fatiga incrementa la susceptibilidad al agrietamiento térmico.
- *Stripping y rutting*: el daño por humedad reduce el módulo dinámico efectivo, aumentando deformaciones críticas y acelerando el ahuellamiento.

Enfoque mecanístico-empírico para modelar interacciones. El enfoque M-E no modela cada interacción de forma explícita, pero las incorpora indirectamente mediante ajustes en los parámetros de los modelos de daño. Ejemplos incluyen:

- Ajuste del número de repeticiones a falla (N_f) en función de la humedad (fatiga–stripping).
- Recalculo de tensiones críticas considerando deformaciones permanentes acumuladas (rutting–fatiga).
- Incorporación de grietas térmicas como puntos de inicio de daño por fatiga (fatiga–fisuración térmica).
- Integración de modelos climáticos que modifican módulos, deformaciones y progresión de grietas (acoplamiento climático).

La expresión general de daño acumulado combinado se representa como:

$$D_{total} = \sum_{k=1}^p w_k \cdot D_k \quad (\text{A.34})$$

donde:

D_{total} : daño acumulado total (adimensional).

D_k : daño acumulado por el mecanismo k (fatiga, rutting, stripping, fisuración térmica).

w_k : factor de ponderación calibrado localmente para reflejar la interacción real.

p : número de mecanismos de deterioro considerados.

Factores que intensifican la interacción de deterioros.

- Condiciones climáticas extremas: aumentan simultáneamente rutting (altas temperaturas) y fisuración térmica (bajas temperaturas).
- Mal drenaje: potencia el stripping y acelera tanto la fatiga como el rutting.
- Altas cargas pesadas repetidas: intensifican todas las formas de daño y amplifican las interacciones.
- Espesores insuficientes: provocan que múltiples modos de falla se desarrollen prematuramente.

Implicancias en el diseño M-E. El enfoque mecanístico-empírico busca minimizar las interacciones adversas mediante:

- Modelos de daño dependientes del clima y del nivel de saturación.
- Selección de materiales resistentes a fatiga, humedad y variaciones térmicas.
- Diseños estructurales robustos que distribuyan adecuadamente los esfuerzos.
- Calibración local de modelos para capturar efectos combinados en condiciones específicas.

- Evaluación de confiabilidad considerando escenarios de interacción de deterioros.

A.8. Modos de deterioro estructural en pavimentos rígidos

En pavimentos rígidos, los modos de deterioro estructural se originan por la respuesta del concreto de cemento portland (PCC) ante cargas repetidas de tránsito y variaciones climáticas. A diferencia de los pavimentos flexibles, donde los daños suelen estar vinculados a la acumulación de deformaciones y fatiga en la carpeta asfáltica, en pavimentos rígidos los mecanismos de falla se relacionan con tensiones de tracción en la losa, interacción con el soporte (subbase y subrasante), y comportamiento de las juntas y bordes.

A.8.1. Fatiga de la losa de concreto

La fatiga en pavimentos rígidos corresponde al proceso de formación y propagación de grietas en la losa de concreto como consecuencia de la repetición de cargas de tránsito. Este deterioro se inicia en zonas críticas de la losa, tales como bordes, esquinas y juntas, donde las tensiones de tracción son más elevadas. La acumulación progresiva de microfisuras reduce la capacidad estructural de la losa, hasta comprometer su funcionalidad y durabilidad.

Enfoque mecanístico. En el análisis mecanicista, la fatiga se evalúa a partir de la comparación entre las tensiones de tracción inducidas por las cargas de tránsito y la resistencia a tracción del concreto. El parámetro fundamental es la *razón de esfuerzo* (SR):

$$SR = \frac{\sigma}{f_t} \quad (\text{A.35})$$

donde:

SR : razón de esfuerzo (adimensional).

σ : tensión de tracción inducida por la carga en la fibra inferior de la losa (MPa).

f_t : resistencia a la tracción del concreto (MPa).

Relación mecanístico-empírica. La vida a fatiga del concreto se define en términos del número de repeticiones de carga admisibles (N_f) como función

del valor de SR . El enfoque M-E emplea relaciones de tipo exponencial calibradas a partir de datos de campo:

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{SR} \right)^{k_2} \quad (\text{A.36})$$

donde:

N_f : número de repeticiones de carga hasta la falla por fatiga.

SR : razón de esfuerzo (adimensional).

k_1, k_2 : constantes de calibración empírica determinadas para el concreto y las condiciones de diseño.

Acumulación de daño. El daño por fatiga en la losa se evalúa con el criterio de Miner, que acumula el efecto de múltiples niveles de carga:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (\text{A.37})$$

donde:

D : daño acumulado en la losa (adimensional).

n_i : número de repeticiones de carga aplicadas en el intervalo i .

N_{fi} : número de repeticiones admisibles hasta la falla por fatiga para el intervalo i .

n : número total de intervalos de carga considerados.

La condición de falla estructural se considera alcanzada cuando $D \geq 1.0$.

Factores que influyen en la fatiga de la losa. El desempeño frente a fatiga en pavimentos rígidos depende de:

- *Propiedades del concreto*: resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y grado de fatiga del material.
- *Espesor de la losa*: mayor espesor reduce tensiones de tracción en la fibra inferior.
- *Tráfico*: magnitud y repetición de ejes pesados.
- *Condiciones climáticas*: gradientes térmicos y de humedad que generan curling y warping, sumando tensiones a las inducidas por cargas.
- *Soporte de la base y subrasante*: uniformidad y rigidez del apoyo.

Implicancias en el diseño M-E. En el diseño mecanístico-empírico, el control de la fatiga de la losa requiere:

- Calcular tensiones de tracción en condiciones críticas de carga y gradientes térmicos.
- Definir espesores de losa que mantengan la razón de esfuerzo (SR) dentro de rangos aceptables.
- Incorporar materiales de alta resistencia a la tracción y control de calidad en la construcción.
- Considerar la confiabilidad del diseño frente a la variabilidad de materiales, clima y tráfico.

A.8.2. Falla en juntas

La falla en juntas constituye uno de los modos de deterioro más característicos en pavimentos rígidos. Se manifiesta como desniveles (*faulting*), bombeo de finos (*pumping*), pérdida de transferencia de carga y agrietamiento adyacente. Su origen radica en la combinación de tres mecanismos principales: la repetición de cargas pesadas en los bordes de la losa, la infiltración de agua en la junta y la erosión progresiva de la base o subbase.

Enfoque mecanístico. En el análisis mecanicista, el comportamiento de las juntas se modela a partir de la **transferencia de carga** entre losas adyacentes. El parámetro fundamental es el *Load Transfer Efficiency* (LTE), expresado como:

$$LTE = \frac{\Delta_{no\ cargado}}{\Delta_{cargado}} \times 100 \quad (A.38)$$

donde:

LTE : eficiencia de transferencia de carga en la junta (%).

$\Delta_{no\ cargado}$: deflexión medida en la losa adyacente no cargada (mm).

$\Delta_{cargado}$: deflexión medida en la losa directamente cargada (mm).

Valores de LTE menores a 70 % indican una transferencia deficiente, lo cual incrementa las tensiones en la losa cargada y acelera el deterioro.

Relación mecanístico-empírica. El enfoque M-E predice el desarrollo de *faulting* en función de variables estructurales, climáticas e hidráulicas. La pérdida de soporte se modela considerando la erosión acumulada de la base (E_b) y la repetición de cargas (N). De forma general, el *faulting* acumulado (F) puede representarse como:

$$F = k_1 \cdot N^{k_2} \cdot E_b^{k_3} \cdot \left(\frac{1}{LTE} \right)^{k_4} \quad (A.39)$$

donde:

F : desnivel acumulado en la junta (mm).

N : número de repeticiones de carga aplicadas.

E_b : índice de erodabilidad de la base (adimensional).

LTE : eficiencia de transferencia de carga en la junta (%).

k_1, k_2, k_3, k_4 : coeficientes empíricos determinados por calibración.

Factores que influyen en la falla en juntas. Los factores más relevantes que condicionan la falla en juntas son:

- *Estructurales*: espesor de losa, espaciamiento entre juntas, rigidez de la base, uso de pasadores (*dowels*).
- *Tráfico*: magnitud, repetición y velocidad de ejes pesados.

- *Hidráulicos*: infiltración de agua, nivel freático y drenaje de la base.
- *Climáticos*: ciclos de congelamiento-deshielo y gradientes térmicos que abren o cierran la junta.

Implicancias en el diseño M-E. El diseño mecanístico-empírico permite controlar la falla en juntas mediante:

- Dimensionamiento adecuado del espesor de losa para reducir tensiones en bordes.
- Implementación de pasadores para mejorar la transferencia de carga.
- Selección de bases con baja erodabilidad y buen drenaje.
- Sellado de juntas para limitar la infiltración de agua.
- Consideración de la confiabilidad del diseño incorporando la variabilidad climática e hidráulica.

A.8.3. Punzonamientos en losas continuas con refuerzo

El punzonamiento en losas continuas con refuerzo (*CRCP, Continuously Reinforced Concrete Pavements*) se refiere a la falla localizada de la losa en las zonas de contacto con la carga, originada por la acción concentrada de ruedas pesadas sobre un área reducida. Este deterioro ocurre cuando los esfuerzos cortantes y de flexión superan la capacidad portante local del concreto, provocando la aparición de grietas en forma de cono truncado o en cuenco alrededor del área de carga.

En pavimentos rígidos con refuerzo continuo, el punzonamiento es menos frecuente que en losas simples, pero puede aparecer en presencia de bases erosionables, falta de confinamiento o elevada repetición de cargas concentradas.

Enfoque mecanístico. Desde el enfoque mecanicista, el punzonamiento se modela como un fenómeno de transferencia de cargas locales. El parámetro crítico es el **esfuerzo cortante en el perímetro crítico** de la carga aplicada (τ):

$$\tau = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (\text{A.40})$$

donde:

τ : esfuerzo cortante promedio en el perímetro crítico (MPa).

P : carga aplicada por la rueda (N).

d : diámetro equivalente del área de contacto de la rueda (m).

h : espesor de la losa de concreto (m).

El punzonamiento ocurre cuando τ supera la resistencia cortante del concreto (τ_{cr}).

Relación mecanístico-empírica. El enfoque M-E incorpora el punzonamiento en CRCP a través de modelos que combinan el cálculo de tensiones y deformaciones locales con la resistencia del concreto. La condición de falla se define mediante una relación de seguridad:

$$FS = \frac{\tau_{cr}}{\tau} \quad (\text{A.41})$$

donde:

FS : factor de seguridad frente al punzonamiento (adimensional).

τ_{cr} : resistencia cortante del concreto en condiciones de diseño (MPa).

τ : esfuerzo cortante inducido por la carga aplicada (MPa).

La losa se considera en riesgo de punzonamiento cuando $FS \leq 1.0$.

Acumulación de daño por punzonamiento. El efecto de cargas repetidas se incorpora mediante un modelo de daño acumulado que reduce progresivamente la resistencia efectiva del concreto. Esto se representa con una ecuación de tipo Miner:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{pi}} \quad (\text{A.42})$$

donde:

D : daño acumulado por punzonamiento (adimensional).

n_i : número de repeticiones de carga aplicadas en el intervalo i .

N_{pi} : número de repeticiones admisibles hasta el punzonamiento para el nivel de carga i .

n : número total de intervalos de carga considerados.

La condición de falla por punzonamiento se alcanza cuando $D \geq 1.0$.

Factores que influyen en el punzonamiento. Los principales factores que condicionan la ocurrencia de punzonamientos en CRCP son:

- *Carga y área de contacto*: magnitud de la carga de rueda y presión de inflado de los neumáticos.
- *Espesor de losa*: mayor espesor disminuye los esfuerzos cortantes en el perímetro crítico.
- *Propiedades del concreto*: resistencia a compresión, tracción y cortante.
- *Condiciones de soporte*: rigidez y erodabilidad de la base o subbase.
- *Tráfico*: repetición de cargas pesadas concentradas en las mismas trayectorias de rueda.
- *Clima*: presencia de humedad en la base que favorezca erosión y pérdida de soporte.

Implicancias en el diseño M-E. El diseño mecánico-empírico de CRCP incorpora el punzonamiento como un modo de deterioro limitante. Las estrategias de control incluyen:

- Definir espesores de losa suficientes para reducir esfuerzos cortantes en el perímetro crítico.
- Seleccionar concretos con adecuada resistencia al cortante y fatiga.
- Diseñar bases no erodables y con capacidad de drenaje para limitar la pérdida de soporte.
- Evaluar la confiabilidad del diseño frente a escenarios de carga repetida y condiciones climáticas adversas.

A.8.4. Deformaciones por gradientes térmicos e higroscópicos

Los pavimentos rígidos están sometidos a variaciones de temperatura y humedad que generan deformaciones diferenciales a lo largo del espesor de la losa de concreto. Estos gradientes producen **curling** (alzamamiento o flexión por gradientes térmicos) y **warping** (curvatura por gradientes de humedad), provocando tensiones adicionales que se superponen a las inducidas por las cargas de tránsito. Con el tiempo, estas tensiones pueden reducir la resistencia a fatiga y acelerar la aparición de grietas.

Enfoque mecanístico. El análisis mecanicista considera la losa como una placa apoyada sobre una fundación elástica (modelo de Westergaard). Las deformaciones diferenciales se calculan en función de los gradientes térmicos o higroscópicos y de las propiedades del concreto.

El **alabeo unitario** (φ) de la losa puede expresarse como:

$$\varphi = \alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta h \quad (\text{A.43})$$

donde:

φ : alabeo unitario de la losa (1/m).

α : coeficiente de dilatación térmica lineal del concreto (1/°C).

ΔT : gradiente de temperatura a través del espesor de la losa (°C).

β : coeficiente de deformación higroscópica del concreto (1/% de humedad).

Δh : gradiente de humedad relativa en el espesor de la losa (%).

La deflexión en los bordes o esquinas debida al curling o warping se relaciona con el alabeo unitario y la longitud característica de la losa.

Tensiones inducidas. El alabeo diferencial genera tensiones internas adicionales que dependen de la rigidez de la losa y de las condiciones de apoyo. Una expresión simplificada de la tensión por gradiente térmico o higroscópico es:

$$\sigma = E_c \cdot h \cdot \varphi \quad (\text{A.44})$$

donde:

σ : tensión inducida por curling o warping (MPa).

E_c : módulo elástico del concreto (MPa).

h : espesor de la losa de concreto (m).

φ : alabeo unitario de la losa (1/m).

Estas tensiones pueden ser de tracción o de compresión según el signo del gradiente (ΔT o Δh) y la restricción al movimiento en los apoyos.

Integración mecanístico-empírica. El enfoque M-E incorpora los gradientes térmicos e higroscópicos mediante modelos de clima (programa EICM) que simulan la variación de temperatura y humedad en la losa y en el sistema de soporte. Los resultados se integran con el cálculo de tensiones de tránsito para evaluar el daño acumulado por fatiga y la potencial aparición de agrietamiento.

Factores que influyen en las deformaciones. Las deformaciones por curling y warping están condicionadas por:

- *Clima*: amplitud térmica diaria y estacional, humedad relativa y ciclos de congelamiento-deshielo.
- *Propiedades del concreto*: coeficiente de dilatación térmica (α), coeficiente de deformación higroscópica (β), módulo de elasticidad y contracción por secado.
- *Geometría de la losa*: espesor y dimensiones (relación longitud–espesor).
- *Condiciones de apoyo*: rigidez y uniformidad de la base, presencia de humedad en la subrasante.

Implicancias en el diseño M-E. En el diseño mecanístico-empírico, el control de deformaciones por gradientes térmicos e higroscópicos requiere:

- Incorporar modelos climáticos que reproduzcan condiciones locales de temperatura y humedad.

- Diseñar espesores de losa adecuados para minimizar tensiones por alabeo diferencial.
- Seleccionar concretos con bajo coeficiente de dilatación térmica y control de contracción por secado.
- Implementar bases estables y uniformes que reduzcan la restricción diferencial en los apoyos.

A.8.5. Abultamientos por expansión térmica y cierre de juntas

Los abultamientos (*blow-ups*) en pavimentos rígidos corresponden a levantamientos súbitos de la losa ocasionados por la *expansión térmica* del concreto cuando las juntas de dilatación no ofrecen espacio suficiente para el movimiento. El cierre completo de la junta genera presiones internas que, al superar la capacidad de confinamiento de la losa y la fricción con la base, se traducen en deformaciones verticales bruscas. Estos fenómenos se presentan típicamente en climas cálidos y en pavimentos envejecidos con juntas obstruidas por materiales incomprensibles.

Enfoque mecanístico. El comportamiento mecanicista se fundamenta en la dilatación térmica del concreto restringida por la fricción de la losa con la base y la falta de apertura en la junta. La **deformación térmica unitaria** (ε_T) se expresa como:

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T \quad (\text{A.45})$$

donde:

ε_T : deformación unitaria por expansión térmica (adimensional).

α : coeficiente de dilatación térmica lineal del concreto ($1/^\circ\text{C}$).

ΔT : variación de temperatura respecto a la condición de referencia ($^\circ\text{C}$).

Cuando las juntas no permiten la expansión libre, esta deformación genera un **esfuerzo de compresión** en la losa (σ_c):

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_T \quad (\text{A.46})$$

donde:

σ_c : esfuerzo de compresión inducido por restricción térmica (MPa).

E_c : módulo de elasticidad del concreto (MPa).

ε_T : deformación térmica unitaria (adimensional).

El cierre de junta produce además una **presión de expansión** (p) que puede estimarse como:

$$p = \frac{E_c \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot h}{L_j} \quad (\text{A.47})$$

donde:

p : presión de expansión en la junta (MPa).

E_c : módulo de elasticidad del concreto (MPa).

α : coeficiente de dilatación térmica lineal (1/°C).

ΔT : incremento de temperatura (°C).

h : espesor de la losa (m).

L_j : espaciamiento entre juntas (m).

El abultamiento ocurre cuando p supera la resistencia de la losa y la fricción en la interfaz losa–base.

Relación mecanístico-empírica. El enfoque M-E incorpora el fenómeno de *blow-up* considerando:

- Gradientes climáticos simulados mediante el modelo EICM (variación térmica diaria y estacional).
- Estado de las juntas (sellado, presencia de materiales incomprensibles, cierre progresivo).
- Espaciamiento de juntas y rigidez de la base.

El riesgo de falla se define cuando la presión de expansión calculada excede la capacidad de la losa, evaluada en términos de resistencia a compresión y de la fricción con la base.

Factores que influyen en los abultamientos.

- *Clima*: incrementos bruscos de temperatura en climas cálidos.
- **Condición de juntas**: obstrucción por arena, piedras o sellos rígidos que impiden la dilatación.
- *Edad del pavimento*: el concreto envejecido presenta menor capacidad de deformación antes de fracturarse.
- *Diseño geométrico*: espaciamientos largos entre juntas incrementan la acumulación de expansión térmica.
- *Base y subbase*: materiales con alta fricción aumentan la restricción al movimiento de la losa.

Implicancias en el diseño M-E. Para controlar los abultamientos en el diseño mecanístico-empírico se recomienda:

- Diseñar espaciamientos de juntas compatibles con el coeficiente de dilatación térmica del concreto y el clima local.
- Mantener juntas limpias y selladas con materiales compresibles.
- Emplear bases con fricción controlada o tratamientos que reduzcan la restricción al movimiento.
- Considerar escenarios críticos de temperatura en el análisis de confiabilidad.

A.8.6. Interacciones entre mecanismos de deterioro en pavimentos rígidos

En pavimentos rígidos, al igual que en los flexibles, los modos de deterioro estructural no ocurren de manera aislada, sino que interactúan de forma acumulativa y sinérgica. El enfoque M-E reconoce estas interacciones y busca integrarlas en los modelos de predicción de desempeño, considerando que la presencia de un mecanismo puede acelerar o amplificar el desarrollo de otro.

Principales interacciones entre deterioros.

- *Fatiga y falla en juntas*: la propagación de grietas por fatiga reduce la capacidad de transferencia de carga en juntas, lo que incrementa el *faulting*. A su vez, la pérdida de soporte en juntas eleva las tensiones

de tracción y acelera el daño por fatiga.

- *Erosión de la base y punzonamiento*: la erosión bajo cargas repetidas y presencia de agua disminuye la capacidad portante, favoreciendo punzonamientos localizados en áreas de alta concentración de esfuerzos.
- *Curling/warping y fatiga*: los gradientes térmicos e higroscópicos inducen tensiones adicionales que se suman a las de tránsito, reduciendo la vida a fatiga de la losa.
- *Cierre de juntas y blow-ups*: el cierre progresivo de juntas obstruidas genera presiones de expansión térmica que, en combinación con fisuras previas, pueden producir levantamientos súbitos (*blow-ups*).
- *Stripping de la base y falla en juntas*: la pérdida de soporte por bombeo de finos incrementa el *faulting* y acelera el deterioro funcional del pavimento.

Modelado mecanístico-empírico de interacciones. El método M-E incorpora las interacciones de deterioro de forma indirecta, ajustando los parámetros de los modelos de predicción:

- Tensiones de fatiga calculadas considerando los efectos de curling y warping.
- Modelos de *faulting* que incluyen la erosión progresiva de la base.
- Evaluación del punzonamiento como función de la pérdida de soporte.
- Análisis de *blow-ups* a partir del cierre de juntas y expansión térmica.

El daño acumulado combinado puede expresarse de manera general como:

$$D_{total} = \sum_{k=1}^p w_k \cdot D_k \quad (\text{A.48})$$

donde:

D_{total} : daño acumulado total (adimensional).

D_k : daño acumulado por el mecanismo k (fatiga, *faulting*, punzonamiento, curling, *blow-ups*).

w_k : factor de ponderación que refleja la interacción entre mecanismos.

p : número de mecanismos de deterioro considerados.

Factores que intensifican la interacción.

- Clima extremo: altas temperaturas favorecen expansión térmica y *blow-ups*; bajas temperaturas intensifican curling y fisuración.
- Deficiencia de drenaje: la presencia de agua en la base potencia erosión, bombeo y falla en juntas.
- Tráfico pesado: cargas repetidas intensifican simultáneamente fatiga, erosión y punzonamiento.
- Deficiencias constructivas: sellado deficiente de juntas o bases inestables incrementan la interacción negativa de deterioros.

Implicancias en el diseño M-E. Considerar las interacciones en el diseño mecanístico-empírico permite:

- Dimensionar losas y juntas considerando cargas, clima y gradientes combinados.
- Seleccionar bases resistentes a la erosión y con drenaje adecuado.
- Definir criterios de confiabilidad que incluyan la ocurrencia simultánea de varios deterioros.
- Implementar mantenimiento preventivo en juntas y bordes para reducir efectos acumulativos.

A.9. Criterios de diseño de pavimentos flexibles bajo el enfoque mecanístico-empírico

El diseño de pavimentos flexibles bajo el método mecanístico-empírico se fundamenta en el análisis estructural de un sistema multicapa, sometido a cargas dinámicas de tránsito y condiciones ambientales variables, y en la comparación de las respuestas obtenidas con criterios de desempeño calibrados empíricamente. A diferencia del método empírico tradicional de la Guía AASHTO 1993, el enfoque M-E permite simular las condiciones reales de operación, capturando la influencia de materiales, tráfico y clima en el deterioro progresivo del pavimento.

El objetivo central del diseño es definir una estructura (espesores y materiales) que asegure que los niveles de daño acumulado para cada modo de deterioro no excedan los límites de servicio establecidos durante la vida de diseño, con un nivel de confiabilidad determinado.

A.9.1. Principales criterios de diseño en pavimentos flexibles

Fatiga de la carpeta asfáltica. El pavimento debe diseñarse para que las tensiones y deformaciones de tracción en la fibra inferior de la carpeta asfáltica no generen un daño acumulado por fatiga superior al límite de falla. Se evalúa mediante la relación entre el número de repeticiones aplicadas (n_i) y el número de repeticiones admisibles hasta la falla (N_{fi}), aplicando el criterio de Miner:

$$D_f = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (\text{A.49})$$

donde:

D_f : daño acumulado por fatiga (adimensional).

n_i : número de repeticiones de carga aplicadas en el intervalo i .

N_{fi} : número de repeticiones admisibles hasta la falla por fatiga en el intervalo i .

n : número total de intervalos de carga considerados.

La condición de servicio exige que $D_f \leq 1.0$.

Deformación permanente (ahuellamiento). El diseño debe garantizar que la acumulación de deformaciones plásticas en las distintas capas (mezcla asfáltica, base, subbase y subrasante) no supere la profundidad máxima admisible de huella (r_{lim}), usualmente establecida en 12-15 mm. La deformación total se expresa como:

$$r_{total} = \sum_{j=1}^m r_j \quad (\text{A.50})$$

donde:

r_{total} : profundidad total de huella (mm).

r_j : deformación acumulada en la capa j (mm).

m : número de capas del pavimento.

La condición de servicio exige que $r_{total} \leq r_{lim}$.

Fisuración térmica transversal. El pavimento debe resistir los ciclos de contracción térmica sin desarrollar una densidad de grietas transversales superior al umbral definido por la agencia vial. Las tensiones térmicas inducidas se estiman con la expresión:

$$\sigma_T = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (\text{A.51})$$

donde:

σ_T : tensión térmica de tracción inducida (MPa).

E : módulo dinámico de la mezcla asfáltica (MPa).

α : coeficiente de dilatación térmica lineal de la mezcla (1/°C).

ΔT : variación de temperatura respecto a la condición inicial (°C).

La condición de falla ocurre si $\sigma_T \geq f_t$, siendo f_t la resistencia a tracción de la mezcla asfáltica.

Reflexión de fisuras. En recapados, el criterio establece que la propagación de fisuras desde capas subyacentes no debe alcanzar niveles de severidad crítica durante el período de diseño. El análisis se realiza en función del tiempo de iniciación y la tasa de propagación de la grieta, evaluados mediante modelos mecanístico-empíricos calibrados.

Daño por humedad y stripping. El pavimento debe garantizar resistencia frente a la acción del agua, asegurando que la reducción de propiedades mecánicas no provoque fallas prematuras. Este criterio se evalúa mediante la relación de resistencia a tracción (TSR):

$$TSR = \frac{ITS_{hmedo}}{ITS_{seco}} \times 100 \quad (A.52)$$

donde:

TSR : relación de resistencia a tracción indirecta (%).

ITS_{hmedo} : resistencia a tracción indirecta de la mezcla en condición húmeda (MPa).

ITS_{seco} : resistencia a tracción indirecta de la mezcla en condición seca (MPa).

Se recomienda un valor mínimo de $TSR \geq 80\%$ (según AASHTO T283).

A.9.2. Condiciones de desempeño y confiabilidad

El diseño M-E establece condiciones de desempeño que deben cumplirse simultáneamente:

- Nivel de servicio funcional: mantener el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) dentro de los límites aceptables.
- Seguridad estructural: asegurar que los daños acumulados en fatiga y deformación permanente sean menores o iguales a 1.0.
- Durabilidad: controlar la aparición de fisuración térmica, stripping y reflexión de fisuras.

- Confiabilidad: satisfacer los criterios de desempeño con una probabilidad de cumplimiento especificada, usualmente entre 85 % y 95 %.

A.9.3. Factores que condicionan los criterios de diseño

- Tráfico: magnitud, espectro y variabilidad de ejes equivalentes.
- Materiales: módulo dinámico del asfalto, módulo resiliente de las capas granulares y de la subrasante.
- Clima: temperatura, humedad, ciclos de congelamiento-deshielo y gradientes térmicos.
- Estructura: espesores de cada capa y condiciones de soporte.
- Construcción y mantenimiento: calidad de compactación, drenaje y sellado.

A.9.4. Implicancias prácticas del enfoque M-E

El enfoque mecanístico-empírico permite:

- Diseñar pavimentos optimizados con mayor eficiencia en el uso de materiales.
- Integrar la variabilidad climática y de tránsito en la predicción de vida útil.
- Seleccionar estrategias de conservación preventiva basadas en el tipo y momento de ocurrencia de deterioros.
- Calibrar localmente los modelos de predicción para reflejar el comportamiento real de materiales y condiciones de servicio en cada región.

A.10. Criterios de diseño de pavimentos rígidos bajo el enfoque mecanístico-empírico

El diseño de pavimentos rígidos bajo el enfoque mecanístico-empírico tiene como propósito asegurar que las tensiones, deformaciones y deflexiones en la losa de concreto, la base y la subrasante, bajo las condiciones de carga y clima previstas, no excedan los límites de resistencia o servicio establecidos para la vida de diseño. A diferencia del método empírico AASHTO 1993, el enfoque M-E integra:

- Modelos estructurales basados en la teoría de placas sobre fundación elástica y elementos finitos.
- Modelos climáticos para evaluar gradientes de temperatura y humedad.
- Modelos empíricos calibrados con bases de datos experimentales (LTPP, AASHTO Road Test).

A.10.1. Principales criterios de diseño en pavimentos rígidos

Fatiga de la losa de concreto. El criterio se basa en que las tensiones de tracción inducidas en la fibra inferior de la losa por la carga repetida no deben acumular un daño superior a 1.0 según el criterio de Miner:

$$D_f = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (\text{A.53})$$

donde:

D_f : daño acumulado por fatiga (adimensional).

n_i : número de repeticiones de carga aplicadas en el intervalo i .

N_{fi} : número de repeticiones admisibles hasta la falla por fatiga para el intervalo i .

n : número total de intervalos de carga considerados.

La condición de servicio exige que $D_f \leq 1.0$.

Erosión y pérdida de soporte. La acción combinada de cargas y agua infiltrada puede erosionar la base y subbase, provocando pérdida de soporte en bordes y esquinas. El criterio establece que la deflexión diferencial admisible en juntas y esquinas debe limitarse para evitar el incremento de tensiones de tracción y la aparición de grietas.

Falla en juntas (*faulting* y *pumping*). El diseño debe controlar que el desnivel acumulado en juntas (*faulting*) no exceda el límite de servicio, usualmente entre 6 y 10 mm. El *faulting* depende del número de repeticiones de carga (N), de la eficiencia de transferencia de carga (LTE), de la erodabilidad de la base (E_b) y del nivel freático. Una forma generalizada de expresión es:

$$F = k_1 \cdot N^{k_2} \cdot E_b^{k_3} \cdot \left(\frac{1}{LTE} \right)^{k_4} \quad (\text{A.54})$$

donde:

F : desnivel acumulado en la junta (mm).

N : número de repeticiones de carga.

E_b : índice de erodabilidad de la base (adimensional).

LTE : eficiencia de transferencia de carga en la junta (%).

k_1, k_2, k_3, k_4 : coeficientes de calibración empírica.

Curling y warping. Los gradientes de temperatura y humedad generan deformaciones diferenciales en la losa, induciendo tensiones adicionales que se suman a las cargas de tránsito. El alabeo unitario se expresa como:

$$\varphi = \alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta h \quad (\text{A.55})$$

donde:

φ : alabeo unitario de la losa (1/m).

α : coeficiente de dilatación térmica lineal del concreto ($1/^\circ\text{C}$).

ΔT : gradiente de temperatura en el espesor de la losa ($^\circ\text{C}$).

β : coeficiente de deformación higroscópica del concreto ($1/\%$ de humedad).

Δh : gradiente de humedad en el espesor de la losa ($\%$).

La tensión inducida por curling o warping se calcula como:

$$\sigma = E_c \cdot h \cdot \varphi \quad (\text{A.56})$$

donde:

σ : tensión inducida (MPa).

E_c : módulo elástico del concreto (MPa).

h : espesor de la losa (m).

φ : alabeo unitario ($1/\text{m}$).

Punzonamiento. El punzonamiento ocurre cuando cargas concentradas superan la resistencia cortante local del concreto. El esfuerzo cortante promedio se calcula como:

$$\tau = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (\text{A.57})$$

donde:

τ : esfuerzo cortante promedio (MPa).

P : carga aplicada por la rueda (N).

d : diámetro equivalente del área de contacto de la rueda (m).

h : espesor de la losa (m).

La condición de falla se alcanza si $\tau \geq \tau_{cr}$, siendo τ_{cr} la resistencia cortante del concreto.

Abultamientos por expansión térmica (*blow-ups*). Los *blow-ups* ocurren cuando las juntas no permiten expansión térmica. La presión interna inducida se estima como:

$$p = \frac{E_c \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot h}{L_j} \quad (\text{A.58})$$

donde:

p : presión de expansión en la junta (MPa).

E_c : módulo elástico del concreto (MPa).

α : coeficiente de dilatación térmica lineal ($1/^\circ\text{C}$).

ΔT : incremento de temperatura ($^\circ\text{C}$).

h : espesor de la losa (m).

L_j : espaciamiento entre juntas (m).

A.10.2. Condiciones de desempeño y confiabilidad

El diseño mecanístico-empírico fija umbrales de desempeño que deben cumplirse:

- Agrietamiento por fatiga: porcentaje de área agrietada $\leq 15\%$.
- Faulting en juntas: $\leq 6-10$ mm.
- Rugosidad (IRI): $\leq 2.5-3.0$ m/km al final del periodo de diseño.
- Blow-ups: riesgo mínimo si las juntas están limpias y bien diseñadas.

Además, se incorpora un nivel de confiabilidad (85–95 %) que asegura el cumplimiento de los criterios bajo condiciones de variabilidad de materiales, tránsito y clima.

A.10.3. Implicancias prácticas

- Optimizar espesores de losa en función del desempeño esperado.
- Incorporar condiciones locales de clima, drenaje y tránsito.
- Facilitar estrategias de conservación preventiva, como sellado de juntas.

- Diseñar con mayor confiabilidad al considerar múltiples modos de falla.

A.11. Tratamiento probabilístico en el diseño mecánico-empírico de pavimentos

El desempeño de un pavimento depende de variables que presentan alta variabilidad inherente y carácter estocástico, tales como los módulos de los materiales, los espesores construidos, la resistencia de mezclas y concretos, así como la demanda de tránsito. El enfoque mecánico-empírico reconoce esta variabilidad y la modela mediante distribuciones de probabilidad y técnicas de simulación numérica, con el fin de estimar la dispersión en los resultados de diseño y definir niveles de confiabilidad adecuados.

A.11.1. Distribuciones probabilísticas aplicadas al diseño M-E

Materiales y geometría. Los parámetros mecánicos y geométricos presentan variaciones asociadas a la naturaleza de los materiales, ensayos de laboratorio y condiciones de construcción. Estos incluyen:

- Módulo resiliente de la subrasante (M_r).
- Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (E^*).
- Módulo elástico del concreto (E_c).
- Espesores construidos (h).
- Resistencia a tracción del concreto o mezcla asfáltica (f_t).

La representación estadística más común es:

- *Distribución normal*: adecuada para variables con variabilidad simétrica alrededor de la media.
- *Distribución log-normal*: usada cuando las variables no pueden tomar valores negativos y presentan asimetría positiva.

La función de densidad de la log-normal se expresa como:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{A.59})$$

donde:

x : variable aleatoria (ejemplo: módulo resiliente).

μ : media del logaritmo natural de x .

σ : desviación estándar del logaritmo natural de x .

Tránsito. El tránsito es una de las principales fuentes de incertidumbre, tanto por su magnitud como por su crecimiento futuro.

Distribución de Poisson Se emplea para modelar el número de repeticiones de carga en intervalos cortos de tiempo:

$$P(N = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (\text{A.60})$$

donde:

$P(N = k)$: probabilidad de que ocurran exactamente k eventos (cargas).

λ : número esperado de eventos en el intervalo.

k : número entero de repeticiones de carga.

Distribución de Weibull Se aplica para modelar la variabilidad en la vida a fatiga o tiempos de falla bajo espectros de carga:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (\text{A.61})$$

donde:

$f(t)$: función de densidad de probabilidad de la vida útil.

β : parámetro de forma (adimensional).

η : parámetro de escala (unidades de tiempo o número de repeticiones).

t : variable aleatoria (tiempo hasta la falla o número de repeticiones).

A.11.2. Simulación Monte Carlo y propagación de incertidumbre

La simulación de Monte Carlo consiste en generar múltiples escenarios de diseño mediante muestreo aleatorio de las variables de entrada según sus distribuciones de probabilidad.

Procedimiento.

- Definir las distribuciones de entrada (módulos, espesores, resistencias, tránsito y clima).
- Generar muestras aleatorias de cada variable siguiendo su distribución.
- Calcular, para cada escenario, las respuestas mecanicistas (tensiones, deformaciones, deflexiones).
- Aplicar los modelos empíricos de daño (fatiga, ahuellamiento, fisuración).
- Repetir el proceso N veces (miles de iteraciones).
- Construir una distribución de resultados de desempeño (vida útil, daño acumulado).

A.11.3. Beneficios del tratamiento probabilístico

- Permite obtener curvas de probabilidad de falla en lugar de valores deterministas.
- Define niveles de confiabilidad en el diseño (ejemplo: autopistas $\geq 95\%$, caminos rurales $\geq 85\%$).
- Identifica variables críticas cuya variabilidad influye más en la vida útil.
- Conduce a diseños más robustos y realistas, evitando sobredimensionamiento o fallas prematuras.

Referencias

- AASHTO. (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice* [Interim Edition]. American Association of State Highway; Transportation Officials.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt (HMA) [AASHTO T 342-20]. *AASHTO*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2023). Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials [AASHTO T 307-99 (R2023)]. *AASHTO*.
- Anguas, P., & Correa, A. (2004). Conceptos Mecánicos en Pavimentos.
- Anochie-Boateng, J., & Maina, J. (2012). Permanent deformation testing for a new South African mechanistic pavement design method. *Construction and Building Materials*, 26, 541-546.

- Anochie-Boateng, J., Steyn, W., Fisher, C., & Truter, L. (2016). A Link of Full-Scale Accelerated Pavement Testing to Long-Term Pavement Performance Study in the Western Cape Province of South Africa.
- Arampamoorthy, H., & Patrick, J. (2010). Failure probability of New Zealand thin surfaced granular pavements.
- ASTM International. (2003). ASTM D1194-94(2003): Standard test method for bearing capacity of soil for static load and spread footings [Withdrawn 2010].
- Ávila, E., Albarracín, F., & Bojorque, J. (2015). Evaluación de pavimentos en base a métodos no destructivos y análisis inverso. *Revista Másken*, 6, 79-93.
- Baus, R., & Stires, N. (2010). Mechanistic-empirical Pavement Design Guide Implementation [Technical Report].
- Beer, M., Sallie, I. M., Rensburg, Y. V., & Kemp, M. (2009). Load Equivalency Factors (LEFs) for Abnormal Vehicles and Mobile Cranes in South Africa Based on the Mechanistic-Empirical Design Methodology.
- Briceño, J., González, G., Briceño, B., & Vargas Castellanos, P. M. (2019). Comparación del desprendimiento de material en pavimentos rígidos reforzados con malla electrosoldada o fibras. *Revista Ingeniería Civil*, 40.
- Bulut, R., Zollinger, D., & Roesler, J. (2013). Evaluation of Environmental Effects in Pavement Design Using the EICM. *Journal of Transportation Engineering*, 139(3), 251-260.
- Burmister, D. M. (1943). The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways. *Highway Research Board Proceedings*, 23, 126-144.
- Burmister, D. M. (1945). The general theory of stresses and displacements in layered systems. *Journal of Applied Physics*, 16(2), 89-94.
- Caron, C., Theillout, J., & Brill, D. (2010). Comparison of US and French Rational Procedures for the Design of Flexible Airfield Pavements.
- Coree, B., Ceylan, H., & Harrington, D. (2005). Implementing the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: Technical Report [Research Report].

- Delgadillo, R., Wahr, C., & Alarcón, J. P. (2011). Toward Implementation of the Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide in Latin America. *Transportation Research Record*, 2226, 142-148.
- Department, I. T. (2023). *Implementation Guide for AASHTOWare Pavement ME Design* (inf. téc.). ITD. Boise, Idaho.
- Dion, E., Perraton, D., Carter, A., & Bilodeau, K. (2015). Characterization of Hot Mix Asphalt with Steel Slag and the Use of Laboratory Results in Mechanistic-Empirical Pavement Design.
- Doré, G., Hein, D., & Tighe, S. (2006). Development of the Roadmap for the Implementation of the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide in Canada.
- Epps, J. (2019). Innovative Asphalt Pavement Technology: Paving the Way for the World’s Roadways. *Transportation Research Record*, 2673, 1-16.
- FHWA. (2008). *Enhanced Integrated Climatic Model (EICM): Technical Documentation* (inf. téc.). Federal Highway Administration. Washington, D.C.
- FHWA. (2013). *Guide for Mechanistic-Empirical Pavement Design Inputs: Material Inputs* (inf. téc. N.º FHWA-HRT-13-XXX). Federal Highway Administration. Washington, D.C.
- FHWA. (2015). *Pavement ME Design Peer Exchange Report* (inf. téc.). Federal Highway Administration. Washington, D.C.
- Fontenele, H. B., & Fernandes Júnior, J. L. (2014). O Efeito da Caracterização do Tráfego no Desempenho do Pavimento. *Revista Transportes*, 23, 09-16.
- Gribble, M., & Patrick, J. (2008). Adaptation of the Austroads Pavement Design Guide for New Zealand conditions.
- Haas, R. (2006). *Developments and Challenges in Mechanistic-Empirical Pavement Design Methods*.
- Haas, R., & Kazmierowski, T. (1996). Canada’s New Pavement Design and Management Guide. *Transportation Association of Canada*, 18.
- Heinimann, H. (2020). Pavement Engineering for Forest Roads. *Croatian Journal of Forest Engineering*.

- Hu, S., Zhou, F., & Scullion, T. (2014). *Development of Texas Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design System (TxME)*.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (2nd). Pearson Education.
- Hughes, T. J. R. (2000). *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Dover Publications.
- Islam, M., Gungor, A., & Elseifi, M. (2023). Multi-State Calibration of MEPDG Distress Models: Case Studies in the United States. *Transportation Research Record*, 2677(4), 45-59.
- Jameson, J., & Shackleton, M. (2008). Guide to pavement technology: part 5: pavement evaluation and treatment design.
- Jayarathna, K., Premarathne, R., & Mampearachchi, W. (2020). Validation of Mechanistic-Empirical Pavement Design Approach for Flexible Pavement Design. *2020 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, 395-400.
- Kamalizadeh, R., Nasimifar, M., & Thyagarajan, S. (2022). Development of an enhanced pavement mechanistic-empirical analysis tool for developing structural deterioration models. *International Journal of Pavement Engineering*, 24.
- Kanenemeyer, L., Theyse, H., Verhaeghe, B., & As, S. (2015). Revision of South African pavement design method.
- Ktari, R., Saint-Laurent, D., Hornych, P., Hammoum, F., Marsac, P., & Nguyen, M. (2020). Effect of climate on asphalt pavement performance using two mechanistic-empirical methods. *International Journal of Pavement Engineering*, 23, 1433-1458.
- Li, Q., Wang, K. C. P., & Qiu, Y. (2007). Comparative Study of Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) Design Methodologies in China and United States. *Proceedings of the International Conference on Transportation Engineering*, 259-264.
- Li, Q., Xiao, D. X., Wang, K. C. P., Hall, K., & Qiu, Y. (2011). Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. *Journal of Modern Transportation*, 19, 114-133.

- Loria, L., Badilla, G., Acuna, M., Elizondo, F., & Aguiar-Moya, J. (2011). Experiences in the characterization of materials used in the calibration of the AASHTO MEPDG for flexible pavement for Costa Rica.
- Ma, H., Wang, D., Zhou, C., & Feng, D. (2015). Calibration on MEPDG Low Temperature Cracking Model and Recommendation on Asphalt Pavement Structures in Seasonal Frozen Region of China. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1-11.
- Mehdawi, W. (2021). *Mechanistic-empirical approach to evaluate new and rehabilitated flexible pavements*.
- Mengue, E., Mroueh, H., Lancelot, L., & Eko, R. (2018). Design and parametric study of a pavement foundation layer made of cement-treated fine-grained lateritic soil. *Soils and Foundations*. <https://doi.org/10.1016/J.SANDF.2018.02.025>
- Moffatt, M. (2017). Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design.
- Mounier, D., Broutin, M., & Bost, R. (2015). Mechanistic-Empirical Procedure for Flexible Airfield Pavement Design: The New French Technical Guidance.
- Nantung, T. (2010). *Research Pays Off: Implementing the Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide for Cost Savings in Indiana*.
- of Transportation, M. D. (2025). *Pavement ME Design User Guide and Local Calibration* (inf. téc.). MDOT. Lansing, Michigan.
- Orobio, A. (2010). Sensitivity analysis of flexible pavement performance parameters in the mechanistic-empirical design guide.
- Orobio, A., & Zaniewski, J. (2011). Sampling-Based Sensitivity Analysis of the Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide Applied to Material Inputs. *Transportation Research Record*, 2226, 85-93.
- Popik, M., Juhász, M., Chan, S., Donovan, H., & St-Laurent, D. (2013). TAC Pavement ME User Group - Canadian Climate Trials.
- Portocarrero, R. C. (2016). Qhapaq ñan itinerario cultural inscrito en la lista del patrimonio mundial, retos y perspectivas. *Arqueología y Sociedad*, (31), 255-270.

- Program, N. C. H. R. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures* (inf. téc. N.º Project 1-37A). Transportation Research Board. Washington, D.C.
- Reddy, J. N. (2006). *Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells* (2.^a ed.). CRC Press.
- Sakhaeifar, M., Zollinger, C., & Nazarian, S. (2019). Calibration of Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Distress Models for Local Conditions. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(5), 602-613.
- Saleh, M. (2011). Implications of using calibrated and validated performance transfer functions in the mechanistic empirical pavement design procedure.
- Saleh, M. (2014). Development of New Fatigue Model for New Zealand Dense Graded Hot Mix Asphalts.
- Soares, J. S., Carvalho, C. G. M., & Pereira, D. d. A. (2020). Avaliação da influência da variação das espessuras das placas de concreto na vida útil de pavimentos rígidos rodoviários. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*.
- Styer, J., Tunstall, L., Landis, A., & Grenfell, J. (2024). Innovations in Pavement Design and Engineering: A 2023 Sustainability Review. *Helixyon*, 10.
- Swan, D., Hein, D., Lane, B., & Kazmierowski, T. (2008). Validation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Using PMS Data.
- Swan, D., Olidis, C., & Berkovitz, M. (2006). Implementation of the Mechanistic-Empirical Design Guide for Canadian Municipal Pavements.
- Theyse, H., De Beer, M., & Rust, F. (1996). Overview of South African Mechanistic Pavement Design Method. *Transportation Research Record*, 1539, 17-23.
- Theyse, H., Maina, J., & Kannemeyer, L. (2007). Revision of the South African flexible pavement design method; mechanistic-empirical components.
- Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of Plates and Shells*. McGraw-Hill.

- Tino, R. (2007). Vías, carreteras y otras calzadas: Breve historia de las mismas. *Cimbra*, 376, 16-25.
- Trejos-Castillo, C., Ávila-Esquivel, T., Aguiar-Moya, J., & Loría-Salazar, L. (2018). Costa Rica's Mechanical Empirical Design Software For Flexible Pavements, CRME.
- Wang, K. C. P., Li, Q., Hall, K., Nguyen, V., Gong, W., & Hou, Z. (2008). Database Support for the New Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. *Transportation Research Record*, 2087, 109-119.
- Westergaard, H. (1926). Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis. *Public Roads*, 7(2), 25-35.
- Zhang, H., Hou, J., Liu, Y., Xuan, D., & Fan, W. (2014). MEPDG Analysis on Relationship between Design Inputs and Performance of Asphalt Pavements. *Applied Mechanics and Materials*, 668-669, 1434-1437.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The Finite Element Method* (6th, Vol. 1). Butterworth-Heinemann.
- Zorio, V. (1987). Breve historia de las carreteras. *Revista Obras Públicas*, 134, 27-38.