

2  
EDICIÓN

# PAVIMENTOS

**Materiales, construcción y diseño**

## Incluye

- INVIAS 2022 (Resolución 1524 del 6 de mayo de 2022)
- IDU 2018 (Resolución 010910 de 2019)

**ECOE**  
EDICIONES

**Hugo Alexander Rondón Quintana**  
**Fredy Alberto Reyes Lizcano**





**PAVIMENTOS  
MATERIALES,  
CONSTRUCCIÓN  
Y DISEÑO**

HUGO ALEXANDER RONDÓN QUINTANA  
FREDY ALBERTO REYES LIZCANO

*SEGUNDA EDICIÓN EN ADELANTE*

Rondón Quintana, Hugo Alexander

Pavimentos : materiales, construcción y diseño / Hugo Alexander Rondón Quintana,  
Fredy Alberto Reyes Lizcano. -- 2a ed. -- Bogotá : Ecoe Ediciones, 2022.  
613 p. -- (Ingeniería y afines. Ingeniería Civil)

Contiene bibliografía

ISBN 978-958-503-114-2 -- 978-958-503-115-9 (digital)

1. Pavimentos - Materiales 2. Ingeniería civil I. Título II. Serie

CDD: 625.8 ed. 23

CO-BoBN- a1087987

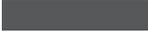
---



**Área:** Ingeniería y afines

**Subárea:** Ingeniería civil

**ECOE**  
EDICIONES



© Hugo Alexander Rondón Quintana

© Fredy Alberto Reyes Lizcano

► Ecoe Ediciones S.A.S.  
info@ecoeediciones.com  
www.ecoeediciones.com  
Carrera 19 # 63C 32, Tel.: 919 80 02  
Bogotá, Colombia

**Segunda edición:** Bogotá, mayo del 2022

**ISBN:** 978-958-503-114-2  
**e-ISBN:** 978-958-503-115-9

Directora editorial: Claudia Garay Castro  
Coordinadora editorial: Paula Bermúdez B.  
Corrección de estilo: Andrés Caro  
Diagramación: Denis Rodríguez Ríos  
Carátula: Wilson Marulanda Muñoz  
Impresión: Carvajal Soluciones de  
comunicación S.A.S.  
Carrera 69 #15-24

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio  
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

*Impreso y hecho en Colombia - Todos los derechos reservados*

# CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>XLI</b>
<b>CAPÍTULO 1. MATERIALES O LIGANTES ASFÁLTICOS.....</b>	<b>1</b>
1.1 Cemento asfáltico .....	2
1.1.1 Generalidades.....	2
1.1.2 Rigidez del cemento asfáltico .....	14
1.1.3 Estructura físico-química .....	15
1.2 Cemento asfáltico modificado .....	16
1.3 Emulsiones asfálticas.....	20
1.4 Asfaltos líquidos, rebajados o <i>cut-back</i> .....	28
1.5 Asfaltos espumados.....	28
1.6 Crudo de Castilla.....	29
1.7 Asfaltos naturales.....	29

<b>CAPÍTULO 2: MEZCLAS ASFÁLTICAS.....</b>	<b>33</b>
2.1 Generalidades .....	33
2.2 Agregados pétreos .....	34
2.3 Mezcla asfáltica abierta en frío .....	39
2.4 Mezcla asfáltica abierta en caliente .....	43
2.5 Mezcla asfáltica densa en frío .....	46
2.6 Concreto asfáltico.....	51
2.7 Mezclas de arena - asfalto.....	64
2.8 Tratamientos superficiales.....	65
2.9 Lechadas asfálticas ( <i>slurry and seal</i> ).....	68
2.10 Mezcla asfáltica drenante.....	71
2.11 Mezclas discontinuas en caliente o microaglomerados.....	74
2.12 Mezclas tibias .....	78
2.12.1 Generalidades y especificación técnica.....	78
2.12.2 Revisión sobre WMA .....	79
2.13 Mezclas asfálticas modificadas.....	94
2.14 Mezclas asfálticas recicladas en frío .....	96
2.15 Mezclas asfálticas recicladas en caliente.....	98
2.16 Bases estabilizadas con emulsión .....	100
2.17 Base o granular estabilizado con asfalto en caliente .....	102
2.18 Granular estabilizado con crudo de Castilla.....	103
2.19 Mezcla asfáltica natural.....	105
2.20 Rigidez de mezclas asfálticas.....	107
<b>CAPÍTULO 3: MECANISMOS DE DAÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA EL DISEÑO .....</b>	<b>111</b>
3.1 Ahuellamiento en mezclas asfálticas.....	111
3.1.1 Generalidades.....	111
3.1.2 Ensayos y equipos .....	114
3.1.2.1 Ensayos de laboratorio.....	114
3.1.2.2 Ensayos a escala real.....	121

---

3.1.3	Factores que afectan la resistencia a la deformación permanente .....	124
3.1.3.1	Carga .....	124
3.1.3.2	Temperatura, velocidad de carga y humedad .....	128
3.1.3.3	Densidad y compactación .....	132
3.1.3.4	Tamaño, tipo, forma y granulometría del agregado pétreo .....	134
3.1.3.5	Tipo de ligante asfáltico .....	138
3.1.4	Ecuaciones para la predicción de la deformación permanente .....	142
3.2	Fatiga en mezclas asfálticas .....	146
3.2.1	Generalidades .....	146
3.2.2	Ensayos .....	149
3.2.2.1	Ensayos de flexión simple .....	149
3.2.2.2	Ensayo diametral .....	151
3.2.2.3	Ensayo cíclico torsional .....	153
3.2.2.4	Ensayos de pista en laboratorio .....	154
3.2.2.5	Ensayos a escala natural .....	156
3.2.2.6	Dispersión de los resultados de los ensayos .....	157
3.2.3	Factores que afectan la resistencia a fatiga .....	158
3.2.3.1	Métodos de compactación de la muestra .....	158
3.2.3.2	Carga .....	160
3.2.3.3	Rigidez de la mezcla .....	167
3.2.3.4	Consistencia del asfalto, características de los agregados, contenido de asfalto y vacíos de aire .....	169
3.2.3.5	Temperatura .....	180
3.2.3.6	Envejecimiento y condiciones ambientales .....	182
3.2.4	Ecuaciones empíricas .....	185
3.3	Daño por humedad .....	192

<b>CAPÍTULO 4: SUPERPAVE</b> .....	195
4.1 Generalidades .....	195
4.2 Niveles de diseño .....	196
4.3 Diseño de mezcla.....	199
4.4 Ensayos para evaluar el comportamiento de la mezcla diseñada.....	211
 <b>CAPÍTULO 5: ENVEJECIMIENTO DE ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS: REVISIÓN</b> .....	 213
5.1 Generalidades .....	213
5.2 Algunos estudios reportados .....	218
5.3 Métodos para disminuir los efectos del envejecimiento .....	230
5.3.1 Rejuvenecedores.....	230
5.3.2 Otros métodos.....	230
 <b>CAPÍTULO 6: EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS</b> .....	 233
6.1 Inventario de daños.....	233
6.1.1 Fisuras .....	233
6.1.2 Deformaciones .....	241
6.1.3 Pérdida de las capas de la estructura .....	243
6.1.4 Daños superficiales .....	245
6.1.5 Otros.....	249
6.2 Inspección de obras de drenaje .....	250
6.3 Estado superficial a través del MDR .....	251
6.4 Determinación del PCI.....	254
6.5 Determinación de la irregularidad superficial.....	255
6.6 Determinación del PSI.....	259
6.7 Determinación del OPI.....	260
6.8 Determinación de la textura superficial .....	260
6.9 Evaluación estructural .....	262
6.9.1 Medidas de deflexión - Ensayos no destructivos.....	263

6.10 Ensayos destructivos .....	266
6.11 Determinación de la capacidad estructural .....	267
6.12 Exploración geotécnica.....	268
6.13 Medición de ruido.....	269
<b>CAPÍTULO 7: ASFALTOS MODIFICADOS CON CAUCHO: ESTUDIO DE SU APLICACIÓN EN COLOMBIA.....</b>	<b>273</b>
7.1 Introducción.....	273
7.2 Generalidades .....	275
7.3 Especificaciones colombianas.....	276
7.4 Ventajas de la utilización del asfalto (GCR).....	280
7.5 Desventajas de la utilización del asfalto (GCR).....	284
7.6 Justificación de utilización en Colombia de mezclas asfálticas modificadas con GCR.....	285
<b>Anexo A. Ficha técnica del crudo de Castilla .....</b>	<b>289</b>
<b>Anexo B. Especificación PG (AASHTO MP 1).....</b>	<b>294</b>
<b>CAPÍTULO 8: CAPAS GRANULARES: GENERALIDADES .....</b>	<b>297</b>
8.1 Base granular.....	297
8.2 Subbase granular .....	300
8.3 Controles constructivos de bases y subbases.....	301
8.4 Afirmados.....	302
8.5 Subrasante mejorada.....	304
8.6 Subrasante.....	305
8.6.1 CBR (Californian Bearing Ratio).....	306
8.6.2 Penetrómetro dinámico de cono (PDC).....	309
8.6.3 Prueba de placa .....	311
8.6.4 Módulo resiliente .....	311
8.6.5 Estudios adicionales .....	319

<b>CAPÍTULO 9: ASPECTOS PARA TENER EN CUENTA DE LOS GRANULARES EN LOS MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES .....</b>	<b>323</b>
9.1 Metodologías de diseño de pavimentos flexibles y especificaciones de materiales.....	324
9.1.1 Métodos de diseño empíricos.....	324
9.1.1.1 Caso colombiano .....	327
9.1.2 Métodos de diseño analíticos, mecanicistas o racionales .....	329
9.2 Nuevos métodos de análisis de pavimentos.....	331
9.2.1 Programas de elementos finitos (FEM) .....	331
9.2.2 Programas de elementos discretos (DEM) .....	333
 <b>CAPÍTULO 10: COMPORTAMIENTO RESILIENTE DE MATERIALES GRANULARES .....</b>	 <b>337</b>
10.1 Módulo resiliente.....	338
10.2 Factores que influyen en el comportamiento resiliente de materiales granulares gruesos.....	343
10.2.1 Influencia del esfuerzo .....	343
10.2.2 Influencia del contenido de agua .....	349
10.2.3 Influencia de la densidad .....	352
10.2.4 Influencia de la granulometría, tamaño máximo, cantidad de finos y forma de la partícula.....	353
10.2.5 Influencia del número, frecuencia de carga e historia de esfuerzo .....	357
10.2.6 Influencia del tipo de ensayo .....	358
10.2.7 Anisotropía .....	360
10.3 Ecuaciones resilientes (elásticas no lineales) para materiales granulares gruesos.....	363
10.4 Factores que influyen en el comportamiento resiliente de materiales fino-granulares.....	369
10.4.1 Influencia del esfuerzo .....	370
10.4.2 Influencia del contenido de agua .....	372
10.4.3 Influencia de la densidad .....	376

10.5 Ecuaciones resilientes (elásticas no lineales) para materiales fino-granulares.....	377
10.6 Síntesis .....	384
<b>CAPÍTULO 11: DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MATERIALES GRANULARES NO TRATADOS .....</b>	<b>387</b>
11.1 Deformación permanente .....	387
11.2 Factores que influyen en la resistencia a la deformación permanente de materiales granulares gruesos.....	388
11.2.1 Influencia del esfuerzo .....	388
11.2.2 Influencia de la historia de esfuerzo .....	393
11.2.3 Influencia del contenido de agua .....	394
11.2.4 Influencia de la densidad .....	398
11.2.5 Influencia del número y frecuencia de carga .....	400
11.2.6 Influencia de la granulometría, tamaño máximo, cantidad de finos y forma de la partícula.....	402
11.2.7 Influencia del tipo de ensayo .....	405
11.3 Ecuaciones de deformación permanente para materiales granulares gruesos.....	408
11.4 Factores que influyen en la resistencia a la deformación permanente de materiales fino-granulares.....	413
11.4.1 Influencia del esfuerzo .....	413
11.4.2 Influencia del contenido de agua .....	414
11.4.3 Influencia de la frecuencia de carga .....	416
11.5 Ecuaciones de deformación permanente en materiales fino-granulares.....	417
11.6 Síntesis .....	420
<b>CAPÍTULO 12: MATERIALES LIGADOS CON CEMENTANTES HIDRÁULICOS.....</b>	<b>421</b>
12.1 Losa de concreto hidráulico para pavimento rígido.....	421
12.1.1 Generalidades.....	421
12.1.2 Elementos que conforman la losa .....	426

12.1.3 Mecanismos de daño en el diseño de pavimentos rígidos .....	434
12.1.4 Aspectos constructivos y especificaciones de materiales.....	435
12.2 Base de concreto hidráulico .....	443
12.3 Bases estabilizadas con cemento hidráulico .....	445
12.4 Suelo-cemento .....	447
12.5 Adoquines de concreto .....	449
<b>CAPÍTULO 13: DISEÑO DE PAVIMENTOS .....</b>	<b>453</b>
13.1 Variables de diseño.....	453
13.1.1 Subrasante.....	453
13.1.2 Tránsito.....	454
13.1.2.1 Tecnología de pesaje en movimiento .....	466
13.2 Método AASHTO (1993) - Pavimentos flexibles y semirrígidos .....	469
13.3 Método AASHTO (1993) - Pavimento rígido .....	478
13.4 Diseño racional para pavimento flexible, rígido y semirrígido (IDU y Universidad de los Andes, 2002).....	481
13.5 Método del Instituto Nacional de Vías - INVIAS (2008) - Pavimento rígido .....	502
13.6 Método PCA (Portland Cement Association, 1984) - Pavimento rígido .....	507
13.7 Método del ICPI (Interlocking Concrete Pavement Institute, 1995) - Pavimentos con adoquines de concreto .....	525
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>531</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1.	Penetrómetro .....	2
FIGURA 1.2.	Comparación del CA clasificado por penetración y viscosidad.....	3
FIGURA 1.3.	Determinación gráfica del IPen.....	6
FIGURA 1.4.	Evolución de la viscosidad con respecto a la temperatura.....	7
FIGURA 1.5.	Viscosímetro rotacional .....	8
FIGURA 1.6.	Aparato de tornillo y bola .....	11
FIGURA 1.7.	Ductilímetro .....	11
FIGURA 1.8.	Copa abierta de Cleveland .....	12
FIGURA 1.9.	Horno RTFOT.....	13
FIGURA 1.10.	Horno PAV .....	13
FIGURA 1.11.	Nomograma de Van der Poel.....	14
FIGURA 1.12.	Estructura físico-química del asfalto, esquema coloidal de Pfeifer.....	15
FIGURA 1.13.	Carrotanque irrigador de asfalto.....	25
FIGURA 1.14.	Cámara de expansión .....	29
FIGURA 1.15.	Gilsonita antes y después de trituración .....	31

FIGURA 2.1.	Agregado pétreos .....	35
FIGURA 2.2.	Máquina de Los Ángeles .....	36
FIGURA 2.3.	Micro-Deval.....	36
FIGURA 2.4.	Calibrador de partículas alargadas aplanadas .....	37
FIGURA 2.5.	Cazuela de Casagrande (izquierda) y método de los rollitos (derecha) .....	39
FIGURA 2.6.	Péndulo TRRL .....	42
FIGURA 2.7.	Viga Benkelman .....	43
FIGURA 2.8.	Aparato Marshall.....	56
FIGURA 2.9.	Pavimentos o finisher .....	60
FIGURA 2.10.	Compactadora vibratoria de rodillo o tambor .....	61
FIGURA 2.11.	Compactadora de neumáticos.....	62
FIGURA 2.12.	Tecnologías y ventajas medioambientales para la producción de mezclas asfálticas .....	78
FIGURA 2.13.	Mezcladoras mecánicas.....	90
FIGURA 2.14.	Agitador mecánico.....	90
FIGURA 2.15.	Equipo para espumar asfalto en el laboratorio.....	90
FIGURA 2.16.	Equipo AMPT .....	94
FIGURA 2.17.	Proceso de fabricación del asfalto-caucho (vía húmeda) .....	95
FIGURA 2.18.	Máquina fresadora .....	96
FIGURA 2.19.	Densidad con densímetro nuclear (izquierda) y cono de arena (derecho) .....	102
FIGURA 3.1.	Vista de una capa asfáltica ahuellada.....	112
FIGURA 3.2.	Estados de deformación .....	113
FIGURA 3.3.	Esquema de un ensayo uniaxial de <i>creep</i> .....	114
FIGURA 3.4.	Esquema del esfuerzo Haversine.....	115
FIGURA 3.5.	Esquemización del ensayo triaxial cíclico al a) inicio de la prueba y b) final de la prueba .....	115
FIGURA 3.6.	Equipo AMPT .....	116
FIGURA 3.7.	Esquema de un ensayo de tracción indirecta .....	117
FIGURA 3.8.	Diagrama del mecanismo del NAT y principio de tracción indirecta .....	117

FIGURA 3.9.	Nottingham Asphalt Tester.....	118
FIGURA 3.10.	Ensayo de pista a pequeña escala.....	118
FIGURA 3.11.	Evolución del desplazamiento en el APA con el a) porcentaje de vacíos con aire, b) contenido de asfalto y c) contenido de <i>filler</i> en la mezcla para 8000 ciclos de carga.....	120
FIGURA 3.12.	Esquema de FPRT.....	120
FIGURA 3.13.	Esquema de TXMLS.....	122
FIGURA 3.14.	NAPTF.....	123
FIGURA 3.15.	Carrusel de fatiga.....	123
FIGURA 3.16.	Carrusel de fatiga de la Universidad de los Andes (izquierda) y la PUJ (derecha).....	124
FIGURA 3.17.	Influencia de la magnitud del esfuerzo vertical.....	125
FIGURA 3.18.	Influencia de la magnitud del esfuerzo vertical $\sigma_1$ . Presión de confinamiento $\sigma_3 = 0.2 \text{ MN/m}^2$ , Temperatura $T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ y frecuencia de carga $f = 30 \text{ Hz}$ .....	125
FIGURA 3.19.	Influencia de la presión de confinamiento $\sigma_3$ . Esfuerzo vertical $\sigma_1 = 0.01 \text{ MN/m}^2$ , Temperatura $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ y frecuencia de carga $f = 30 \text{ Hz}$ .....	126
FIGURA 3.20.	Influencia del confinamiento y la frecuencia de carga.....	126
FIGURA 3.21.	Evolución de la rigidez de una mezcla asfáltica con la presión de confinamiento para una temperatura de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (izquierda) y de $54 \text{ }^\circ\text{C}$ (derecha).....	127
FIGURA 3.22.	Efecto del tipo de llanta sobre la acumulación de la deformación permanente.....	127
FIGURA 3.23.	Influencia de la magnitud del esfuerzo vertical.....	128
FIGURA 3.24.	Influencia de la temperatura.....	129
FIGURA 3.25.	Influencia de la magnitud del esfuerzo vertical ( $\sigma$ ) y de la temperatura ( $T$ ) sobre la relación (tasa de deformación) entre la deformación plástica ( $\epsilon_p$ ) y el número de ciclos de carga ( $N$ ).....	129
FIGURA 3.26.	Efecto del grado de compactación y de la temperatura sobre la rigidez de una mezcla asfáltica.....	130
FIGURA 3.27.	Influencia de la velocidad de deformación sobre la resistencia a compresión de una mezcla asfáltica.....	131

FIGURA 3.28.	Influencia de la velocidad de carga.....	131
FIGURA 3.29.	Influencia del grado de compactación .....	132
FIGURA 3.30.	Acumulación de la deformación permanente para mezclas fabricadas por el método de compactación <i>Marshall</i> y SUPERPAVE. Temperatura de ensayo = 40 °C.....	133
FIGURA 3.31.	Variación del módulo resiliente con la temperatura para mezclas fabricadas por el método de compactación <i>Marshall</i> y SUPERPAVE .....	133
FIGURA 3.32.	Influencia del contenido de <i>filler</i> .....	135
FIGURA 3.33.	Efecto de la forma de partículas y del contenido de vacíos sobre la rigidez de mezclas asfálticas.....	136
FIGURA 3.34.	Efecto del contenido de asfalto y de vacíos en la mezcla sobre el fenómeno de ahuellamiento en mezclas asfálticas ...	136
FIGURA 3.35.	Evolución de la deformación permanente con los vacíos con aire y con la temperatura .....	137
FIGURA 3.36.	Influencia del grado PG del CA .....	139
FIGURA 3.37.	Influencia del caucho molido de llanta .....	139
FIGURA 3.38.	Influencia del tamaño de grano de caucho molido de llanta .....	140
FIGURA 3.39.	Influencia del caucho y del SBS.....	140
FIGURA 3.40.	Evolución de la deformación permanente vertical vs. asfaltita para mezclas modificadas empleando CA 80-100 .....	141
FIGURA 3.41.	Evolución de la deformación con el número de pulsos de carga para una mezcla modificada con un desecho de PVC.....	141
FIGURA 3.42.	Agrietamiento tipo piel de cocodrilo .....	147
FIGURA 3.43.	Aparato de flexión en cuatro puntos .....	149
FIGURA 3.44.	Esquema del ensayo de flexión en cuatro puntos .....	150
FIGURA 3.45.	Equipo de ensayo de probeta trapezoidal .....	150
FIGURA 3.46.	Equipo de ensayo de probeta trapezoidal .....	150
FIGURA 3.47.	Equipo NAT de la Pontificia Universidad Javeriana.....	151
FIGURA 3.48.	Configuración de carga y falla en el ensayo diametral.....	152

Figura 3.49.	Estado de esfuerzo biaxial en el ensayo diametral.....	152
Figura 3.50.	Formas de falla de las muestras ITFT falla ideal, b) fisura sencilla, c) doble fisura, d) doble división, e) fisura múltiple, falla con aplastamiento localizado, g) Falla combinada: aplastamiento y fisura múltiple, h) falla combinada: aplastamiento y fisura múltiple, falla y deformación total.....	153
FIGURA 3.51.	Equipo DMA .....	154
FIGURA 3.52.	Imagen izquierda: muestra SGC después de que las muestras DMA han sido extraídas.....	154
FIGURA 3.53.	Representación esquemática de la máquina de ensayo de pista en laboratorio .....	155
FIGURA 3.54.	Ensayo de pista a baja escala.....	155
FIGURA 3.55.	Simulación de un eje trídrem con llantas sencillas en el carrusel de fatiga .....	156
FIGURA 3.56.	Simulación de ejes sencillos con llantas dobles en el carrusel de fatiga .....	157
FIGURA 3.57.	Esquema de la compactación giratoria .....	159
FIGURA 3.58.	Representación esquemática del comportamiento a la fatiga de los materiales de pavimento asfáltico bajo varios modos de carga.....	161
FIGURA 3.59.	Ensayo sin período de recuperación .....	163
FIGURA 3.60.	Efecto de un intervalo de receso sobre el módulo de rigidez.....	164
FIGURA 3.61.	Módulo dinámico de la mezcla AMM debido al daño por fatiga y a los períodos de receso.....	166
FIGURA 3.62.	Evolución del módulo resiliente ( $E_r$ ) de una mezcla asfáltica tipo MDC-2 con la temperatura y la frecuencia de carga ( $f$ ).....	167
FIGURA 3.63.	Esfuerzo de flexión vs. número de ciclos a la falla, para mezclas de diferente rigidez ( $S$ ).....	168
FIGURA 3.64.	Predicción de la vida a la fatiga a partir de la rigidez inicial de la mezcla.....	168

FIGURA 3.65.	Efecto del contenido de vacíos sobre la vida a la fatiga: mezcla británica estándar gradación 594, 7.9 % de asfalto....	169
FIGURA 3.66.	Efecto del contenido de vacíos sobre la vida a la fatiga: mezcla de gradación fina, 6 % de asfalto.....	170
FIGURA 3.67.	Efecto del contenido de vacíos sobre la vida a la fatiga: mezcla de gradación gruesa, 6 % de asfalto .....	170
FIGURA 3.68.	Efecto del contenido de vacíos sobre la vida a la fatiga de la mezcla.....	171
FIGURA 3.69.	Efecto del contenido de vacíos de aire y del contenido de asfalto sobre la vida a la fatiga (150 micras de deformación).....	172
FIGURA 3.70.	Respuesta a la fatiga de todas las mezclas ensayadas envejecidas durante siete meses a 140 °F .....	174
FIGURA 3.71.	Evolución de la tasa promedio de agrietamiento y del número de ciclos finales de carga con la penetración del asfalto.....	175
FIGURA 3.72.	Evolución de la tasa promedio de agrietamiento con el tamaño máximo de partícula .....	176
FIGURA 3.73.	Evolución de la tasa promedio de agrietamiento con el módulo de corte resiliente $G^*$ y el ángulo de fase $\alpha$ .....	176
FIGURA 3.74.	Contenido de asfalto vs. número de aplicaciones a la falla para dos tipos de agregado .....	177
FIGURA 3.75.	Efecto de la gradación de los agregados sobre la relación entre la deformación inicial en flexión y las aplicaciones a la falla.....	177
FIGURA 3.76.	Ilustración de la superficie de corte y de los tomogramas.....	179
FIGURA 3.77.	Evaluación de tomogramas mostrando las partículas y los vacíos .....	179
FIGURA 3.78.	Resultados de los ensayos de fatiga sobre muestras de <i>sandsheet</i> a varias temperaturas y velocidades, bajo esfuerzo controlado .....	180
FIGURA 3.79.	Temperatura del ensayo vs. número de aplicaciones a la falla.....	181
FIGURA 3.80.	Resultados de fatiga para muestras de mezcla asfáltica a varias temperaturas bajo deformación torsional controlada .....	181

FIGURA 3.81.	Ley de fatiga para mezclas asfálticas modificadas con grano-caucho.....	182
FIGURA 3.82.	Relación de esfuerzo térmico vs. rigidez de la mezcla .....	183
FIGURA 3.83.	Resultado típico de un ensayo tsrst.....	184
FIGURA 3.84.	Temperatura de fractura vs. tiempo de envejecimiento a temperaturas de a) 50 °C y b) 85 °C.....	184
FIGURA 3.85.	Curva de Wholer (ley de fatiga) para ensayos bajo .....	186
FIGURA 3.86.	Deformación inicial vs. aplicaciones de carga. Comparación para ensayos bajo esfuerzo controlado y a deformación controlada .....	187
FIGURA 4.1.	Compactador giratorio SUPERPAVE .....	197
FIGURA 4.2.	Muestra obtenida del compactador giratorio SUPERPAVE (izquierda) vs. <i>Marshall</i> (derecha).....	197
FIGURA 4.3.	Granulometría recomendada para agregado pétreo con NMAS = 12.5 mm .....	199
FIGURA 4.4.	Ejemplo de límites para la granulometría SUPERPAVE .....	200
FIGURA 4.5.	Reómetro dinámico de corte DSR de la Pontificia Universidad Javeriana.....	203
FIGURA 4.6.	Muestra para el ensayo DSR.....	203
FIGURA 4.7.	Ángulo de fase .....	204
FIGURA 4.8.	Aplicación de la sollicitación sobre un asfalto CA 50-70. Tensión de corte para los ciclos de carga de 0.1, 160, 320 [Pa] - ensayo MSCR.....	205
FIGURA 4.9.	Respuesta de un asfalto CA 50-70: deformación de corte para los ciclos de carga de 0.1, 160, 320 [Pa] - Ensayo MSCR.....	205
FIGURA 4.10.	Modelo de fatiga de un asfalto CA 50-70.....	207
FIGURA 4.11.	Reómetro de viga en flexión - BBR.....	208
FIGURA 4.12.	Muestra para el ensayo BBR .....	208
FIGURA 4.13.	Equipo DDT .....	209
FIGURA 4.14.	Propiedades de desempeño de los equipos de prueba .....	209
FIGURA 4.15.	Viga en flexión.....	212

FIGURA 6.1.	Fisura longitudinal.....	235
FIGURA 6.2.	Fisura transversal .....	235
FIGURA 6.3.	Agrietamiento tipo malla eslabonada.....	236
FIGURA 6.4.	Piel de cocodrilo.....	236
FIGURA 6.5.	Fisura en bloque .....	237
FIGURA 6.6.	Fisura longitudinal en junta de construcción.....	238
FIGURA 6.7.	Fisura transversal en junta de construcción .....	238
FIGURA 6.8.	Fisura por reflexión de juntas en placas de concreto.....	239
FIGURA 6.9.	Fisura en media luna .....	239
FIGURA 6.10.	Fisura de borde.....	240
FIGURA 6.11.	Fisura por deslizamiento.....	240
FIGURA 6.12.	Ahuellamiento .....	241
FIGURA 6.13.	Hundimiento .....	242
FIGURA 6.14.	Ondulación .....	243
FIGURA 6.15.	Descascaramiento .....	244
FIGURA 6.16.	Bache.....	244
FIGURA 6.17.	Parches.....	245
FIGURA 6.18.	Desgaste superficial.....	246
FIGURA 6.19.	Pérdida de agregado pétreo .....	246
FIGURA 6.20.	Surcos.....	247
FIGURA 6.21.	Pulimento del agregado pétreo .....	247
FIGURA 6.22.	Cabezas duras .....	248
FIGURA 6.23.	Exudación .....	248
FIGURA 6.24.	Afloramiento de agua .....	249
FIGURA 6.25.	Afloramiento de finos .....	250
FIGURA 6.26.	Corrimiento vertical de la berma.....	250
FIGURA 6.27.	Curva de calibración PAVER para el deterioro por corrugación.....	251
FIGURA 6.28.	Curva de calibración PAVER para fisuras longitudinales y transversales.....	252

FIGURA 6.29.	Curva de calibración PAVER para baches .....	252
FIGURA 6.30.	Curva de calibración PAVER para piel de cocodrilo.....	252
FIGURA 6.31.	Curva de calibración PAVER para hundimientos .....	253
FIGURA 6.32.	Curva de calibración PAVER para exudación.....	253
FIGURA 6.33.	Curva de calibración PAVER para desgaste superficial .....	253
FIGURA 6.34.	Curva de calibración PAVER para ahuellamiento .....	254
FIGURA 6.35.	Equipos de topografía (mira y nivel).....	255
FIGURA 6.36.	Representación gráfica del modelo cuarto de carro .....	256
FIGURA 6.37.	Perfilógrafo láser .....	258
FIGURA 6.38.	MERLIN.....	258
FIGURA 6.39.	Perfilógrafo de California.....	258
FIGURA 6.40.	Analizador de rugosidad superficial (ARS).....	259
FIGURA 6.41.	Círculo de arena .....	261
FIGURA 6.42.	FWD .....	264
FIGURA 6.43.	Viga Benkelman .....	264
FIGURA 6.44.	Curviámetro.....	264
FIGURA 6.45.	Deflectógrafo tipo Lacroix .....	265
FIGURA 6.46.	Imagen de un apique sobre un suelo .....	266
FIGURA 6.47.	Núcleo de capa asfáltica .....	267
FIGURA 6.48.	Medición utilizando el método SPB.....	271
FIGURA 6.49.	Comparación medición de ruido utilizando mecanismos tipo CPB y CPX.....	271
FIGURA 7.1.	Distribución de aprovechamiento de las llantas usadas en la cadena de gestión (porcentaje en toneladas).....	274
FIGURA 7.2.	Ley de fatiga para mezclas asfálticas modificadas con grano-caucho.....	281
FIGURA 7.3.	Influencia del caucho molido de llanta .....	281
FIGURA 7.4.	Influencia del tamaño de grano de caucho molido de llanta .....	282
FIGURA 7.5.	Influencia del caucho y del SBS.....	282

FIGURA 7.6.	Costo de mantenimiento de vías pavimentadas con mezclas convencionales y modificadas con asfalto-GCR en Arizona (USA) .....	286
FIGURA 8.1.	Material tipo rajón .....	304
FIGURA 8.2.	Equipo para ejecución del ensayo CBR en laboratorio .....	307
FIGURA 8.3.	Equipo para ejecución del ensayo CBR <i>in situ</i> .....	307
FIGURA 8.4.	Equipo de penetración con cono dinámico.....	310
FIGURA 8.5.	Ejemplo típico de un resultado de un ensayo PDC .....	310
FIGURA 8.6.	Equipo para el ensayo de placa.....	311
FIGURA 8.7.	Equipo triaxial cíclico .....	312
FIGURA 8.8.	Esfuerzos actuantes sobre la muestra .....	312
FIGURA 8.9.	Relación entre el CBR y el módulo resiliente ( $M_r$ ). .....	314
FIGURA 8.10.	Correlación entre $M_r$ y CBR .....	316
FIGURA 8.11.	Equipo <i>FWD</i> .....	316
FIGURA 9.1.	Desarrollo de deformación permanente en experimentos del Transport Research Laboratory (TRL) en Alconbury Hill .....	325
FIGURA 9.2.	Estructuras de pavimento ensayadas en un HVS .....	326
FIGURA 9.3.	Resultados de desplazamiento de estructuras ensayadas en un HVS .....	326
FIGURA 9.4.	Sistema multicapa elástico para el análisis de pavimentos.....	330
FIGURA 9.5.	Campo de esfuerzos ( $p$ , $q$ ) en la capa de base de un pavimento flexible con espesor de capa asfáltica de 6 cm; $p$ es la presión media, y $q$ es el esfuerzo desviador .....	331
FIGURA 9.6.	Variación de esfuerzos con respecto al tiempo cuando se aplica una carga vehicular .....	333
FIGURA 10.1.	Esquema de un equipo triaxial.....	339
FIGURA 10.2.	Estado de esfuerzos durante la ejecución del ensayo de módulo resiliente .....	339
FIGURA 10.3.	Curva típica de un ensayo triaxial cíclico sobre un material granular .....	340

FIGURA 10.4.	Trayectorias de esfuerzos para el cálculo del módulo resiliente. A la izquierda se presenta la trayectoria para los ensayos PCV y a la derecha la de los PCC .....	340
FIGURA 10.5.	Mediciones <i>in situ</i> del esfuerzo vertical en subrasante .....	342
FIGURA 10.6.	Tiempo de pulsación del esfuerzo vertical con carga senoidal y triangular .....	342
FIGURA 10.7.	Variación del módulo resiliente con $\theta$ .....	344
FIGURA 10.8.	Variación del $M_r$ con $\theta$ calculado en un simulador de vehículo pesado (HVS, por su sigla en inglés).....	344
FIGURA 10.9.	Variación del módulo resiliente con $\theta$ y con el esfuerzo desviador ( $q$ ) .....	345
FIGURA 10.10.	Variación del módulo resiliente con $\theta$ y con el esfuerzo desviador ( $q$ ) .....	345
FIGURA 10.11.	Variación del módulo resiliente con el esfuerzo octaédrico de corte.....	346
FIGURA 10.12.	Variación del módulo resiliente con el esfuerzo desviador .....	346
FIGURA 10.13.	Variación del módulo resiliente con el esfuerzo desviador; $p$ es la presión media inicial del ensayo o presión de cámara .....	347
FIGURA 10.14.	Variación del módulo resiliente con la suma de esfuerzos principales .....	348
FIGURA 10.15.	Módulo resiliente de una grava densa.....	348
FIGURA 10.16.	Efecto del grado de saturación sobre el $M_r$ para $\theta = 10$ psi y $N = 159$ .....	350
FIGURA 10.17.	Efecto del contenido de agua sobre el módulo resiliente.....	350
FIGURA 10.18.	Efecto del contenido de agua sobre el $M_r$ .....	351
FIGURA 10.19.	Efecto del grado de saturación sobre el módulo resiliente ....	351
FIGURA 10.20.	Efecto de la densidad sobre el módulo resiliente.....	352
FIGURA 10.21.	Efecto de la densidad sobre el módulo.....	352
FIGURA 10.22.	Efecto del contenido de finos sobre el módulo .....	353
FIGURA 10.23.	Efecto del tipo de material sobre el módulo .....	354
FIGURA 10.24.	Efecto del tamaño de la muestra sobre el módulo resiliente.....	354

FIGURA 10.25.	Influencia del tamaño máximo de partícula sobre el $M_r$ .....	355
FIGURA 10.26.	Valores de $M_r$ para tres granulometrías distintas.....	356
FIGURA 10.27.	Efecto del contenido de finos sobre el $M_r$ empleando material en estado seco, húmedo y que ha experimentado ciclos de congelamiento-secado .....	357
FIGURA 10.28.	Efecto de la frecuencia de carga sobre el módulo resiliente .....	358
FIGURA 10.29.	Variación del módulo resiliente con el tipo de ensayo.....	359
FIGURA 10.30.	Trayectorias de esfuerzo utilizadas por a) Allen y Thompson (1974) (izquierda) y b) Brown y Hyde (1975) (derecha) .....	359
FIGURA 10.31.	Variación del módulo resiliente con $\theta$ .....	360
FIGURA 10.32.	Variación de la rigidez vertical ( $E_y$ ) y lateral ( $E_x$ ) en un material granular. $J_2$ es la segunda invariante del tensor de esfuerzo desviador .....	360
FIGURA 10.33.	Distribución de esfuerzo vertical en un pavimento .....	362
FIGURA 10.34.	Distribución de esfuerzo horizontal en un pavimento .....	362
FIGURA 10.35.	Estructura de pavimento simulada.....	369
FIGURA 10.36.	Deformación vertical en la capa granular de base. El modelo 1 emplea una ecuación elástica lineal, y el modelo 2, una hipoplástica .....	369
FIGURA 10.37.	Evolución del $M_r$ con el esfuerzo desviador .....	370
FIGURA 10.38.	Influencia de la presión de confinamiento ( $\sigma_3$ ) sobre el $M_r$ ..	371
FIGURA 10.39.	Influencia de la presión de confinamiento ( $\sigma_3$ ) sobre el $M_r$ ..	371
FIGURA 10.40.	Evolución del $M_r$ con el esfuerzo desviador .....	372
FIGURA 10.41.	Evolución del $M_r$ con el grado de saturación.....	372
FIGURA 10.42.	Evolución del $M_r$ para una muestra de arcilla con contenido de agua inferior al OMC y b) superior al OMC.....	374
FIGURA 10.43.	Evolución del $M_r$ para una muestra de arcilla con el contenido de agua.....	374
FIGURA 10.44.	Evolución del $M_r$ con la succión.....	375
FIGURA 10.45.	Evolución del $M_r$ con el esfuerzo desviador y con la succión .....	376

FIGURA 10.46.	Evolución del $M_r$ con el esfuerzo desviador y con la succión para suelos a) A-7-6 y b) A-6.....	376
FIGURA 10.47.	Evolución del $M_r$ con el porcentaje de compactación Proctor.....	377
FIGURA 10.48.	Representación esquemática de evolución del $M_r$ con la densidad y con el contenido de agua.....	377
FIGURA 10.49.	Representación esquemática del modelo bilineal.....	378
FIGURA 10.50.	Representación esquemática del modelo hiperbólico.....	380
FIGURA 10.51.	Evolución del $M_r$ con la resistencia a la deformación inconfiada al 1 % de deformación.....	381
FIGURA 11.1.	Curva típica esfuerzo-deformación en un ciclo de carga y descarga.....	387
FIGURA 11.2.	Influencia del nivel de esfuerzo sobre la acumulación de la deformación permanente.....	388
FIGURA 11.3.	Influencia del esfuerzo axial sobre la acumulación de la deformación permanente.....	389
FIGURA 11.4.	Influencia del esfuerzo desviador sobre la deformación permanente. $\sigma_3 = 100$ kPa.....	389
FIGURA 11.5.	Influencia de la presión media inicial ( $p$ ) sobre la deformación permanente. $q = 150$ kPa.....	390
FIGURA 11.6.	Influencia del nivel de esfuerzo sobre la acumulación de la deformación permanente.....	390
FIGURA 11.7.	Deformación permanente vs. $q/p$ , $N = 20000$ (Gidel <i>et al.</i> , 2001). a) Sorèze, b) Poulmarch.....	391
FIGURA 11.8.	Deformación permanente axial vs. $N$ . $q = 35$ kPa, $p = 70$ kPa.....	392
FIGURA 11.9.	Deformación permanente axial vs. $N$ . $q = 280$ kPa, $p = 140$ kPa.....	392
FIGURA 11.10.	Deformación permanente axial vs. $N$ . $q = 840$ kPa, $p = 140$ kPa.....	393
FIGURA 11.11.	Influencia de la historia de esfuerzos.....	394
FIGURA 11.12.	Influencia de la condición de drenaje sobre la acumulación de la deformación permanente, $\sigma_3 = 70$ kPa..	396
FIGURA 11.13.	Influencia de las condiciones de drenaje sobre la deformación permanente.....	396

FIGURA 11.14.	Influencia de las condiciones de drenaje sobre la deformación permanente.....	397
FIGURA 11.15.	Efecto de la elevación del nivel freático sobre la deformación permanente.....	397
FIGURA 11.16.	Influencia del grado de saturación sobre la relación de esfuerzo desviador/resistencia monotónica de corte), en la cual las deformaciones permanentes tienden a estabilizarse.....	398
FIGURA 11.17.	Efecto de la densidad sobre la acumulación de la deformación permanente.....	399
FIGURA 11.18.	Deformación permanente vs. número de ciclos de carga.....	399
FIGURA 11.19.	Influencia de la frecuencia de carga sobre la relación de vacíos de un material granular .....	401
FIGURA 11.20.	Influencia de la frecuencia de carga sobre la amplitud de la deformación.....	401
FIGURA 11.21.	Influencia del contenido de finos sobre la acumulación de la deformación permanente.....	403
FIGURA 11.22.	Influencia del tipo de material granular sobre la deformación permanente.....	403
FIGURA 11.23.	Influencia del tipo de material sobre la acumulación de la deformación permanente.....	404
FIGURA 11.24.	Carruseles de fatiga.....	405
FIGURA 11.25.	Deformación permanente versus $q_{m\acute{a}x}/\sigma_{3med}$ .....	407
FIGURA 11.26.	Evolución de la deformación permanente vertical y volumétrica con el número de ciclos de carga en ensayos PCC y PCV.....	408
FIGURA 11.27.	Evolución de la deformación vertical permanente con el esfuerzo sobre una arcilla A-6.....	413
FIGURA 11.28.	Relación entre la deformación permanente y el módulo resiliente .....	414
FIGURA 11.29.	Evolución de la deformación permanente con la humedad y el esfuerzo desviador.....	415
FIGURA 11.30.	Evolución de la deformación permanente con la frecuencia de carga para una muestra de arcilla saturada al a) 95 % y b) 63 %.....	416

FIGURA 11.31.	Evolución de la deformación permanente con la frecuencia de carga.....	417
FIGURA 12.1.	Compactación con regla.....	424
FIGURA 12.2.	Compactación con rodillo liso .....	424
FIGURA 12.3.	Pavimentadora de concreto .....	425
FIGURA 12.4.	Llana flotadora de pavimentadora de concreto.....	425
FIGURA 12.5.	Llana manual para el sello de poros superficiales.....	425
FIGURA 12.6.	Proceso de microtexturizado longitudinal .....	425
FIGURA 12.7.	Textura transversal empleando un cepillo texturizador .....	426
FIGURA 12.8.	Perfil típico de una estructura de pavimento rígido con junta con pasadores .....	426
FIGURA 12.9.	Vista de planta típica de una losa de pavimento rígido con junta con pasadores y barras de anclaje.....	427
FIGURA 12.10a.	Perfil típico de juntas: a) cuando el concreto se ha construido a ambos lados de la junta .....	427
FIGURA 12.10b.	Perfil típico de juntas: b) junta de expansión o de aislamiento .....	428
FIGURA 12.11.	Ejemplo de una vista en planta de juntas de expansión: a) triangular rodeando un sumidero; b) circular rodeando un pozo de inspección .....	428
FIGURA 12.12.	Agrietamiento por retracción del concreto .....	429
FIGURA 12.13.	Fenómeno de alabeo .....	430
FIGURA 12.14.	Corte de losas para construcción de juntas .....	431
FIGURA 12.15.	Canasta con pasadores en una junta transversal.....	432
FIGURA 12.16.	Proceso de sellado de una junta .....	434
FIGURA 12.17.	Agrietamiento en losas.....	435
FIGURA 12.18.	Perfil típico de estructura de pavimento articulado .....	449
FIGURA 12.19.	Vista en planta típica de estructura de pavimento articulado .....	450
FIGURA 12.20.	Vista en planta de un patrón de colocación de adoquines tipo “espina de pescado”.....	451
FIGURA 13.1.	Evolución histórica del TPDS en el tiempo .....	463
FIGURA 13.2.	Placa en flexión.....	467

FIGURA 13.3.	Esquema de celdas de carga.....	468
FIGURA 13.4.	Sensor piezoeléctrico.....	468
FIGURA 13.5.	Sensor de capacitancia.....	469
FIGURA 13.6.	Fibra óptica.....	469
FIGURA 13.7.	Coefficiente estructural $a_1$ para mezcla de concreto asfáltico.....	471
FIGURA 13.8.	Coefficiente estructural $a_2$ para base granular no tratada.....	471
FIGURA 13.9.	Coefficiente estructural $a_3$ para subbase granular no tratada.....	472
FIGURA 13.10.	Esquemmatización del programa CEDEM.....	483
FIGURA 13.11.	Datos de entrada al programa CEDEM.....	483
FIGURA 13.12.	Datos de entrada al programa CEDEM para pavimento flexible con capas granulares.....	489
FIGURA 13.13.	Presentación de los resultados de la simulación para pavimento flexible con capas granulares.....	490
FIGURA 13.14.	Datos de entrada al programa CEDEM para simulación para pavimento flexible con capas granulares.....	491
FIGURA 13.15.	Presentación de los resultados de la simulación para pavimento flexible con capas granulares.....	492
FIGURA 13.16.	Datos de entrada al programa CEDEM para capas asfálticas gruesas.....	493
FIGURA 13.17.	Presentación de los resultados de la simulación para capas asfálticas gruesas.....	494
FIGURA 13.18.	Datos de entrada al programa CEDEM para simulación de pavimento en concreto con pasadores.....	496
FIGURA 13.19.	Presentación de los resultados de la simulación de pavimento en concreto con pasadores.....	497
FIGURA 13.20.	Datos de entrada al programa cedem para simulación de pavimento en concreto con pasadores.....	498
FIGURA 13.21.	Presentación de los resultados de la simulación de pavimento en concreto con pasadores.....	499
FIGURA 13.22.	Datos de entrada al programa CEDEM para simulación del pavimento semirrígido.....	500

---

FIGURA 13.23.	Presentación de los resultados de la simulación del pavimento semirrígido.....	501
FIGURA 13.24.	Cálculo del número de ejes admisibles para el análisis de fatiga por carga.....	513
FIGURA 13.25.	Factor de erosión (sin confinamiento lateral) .....	519
FIGURA 13.26.	Factor de erosión (con confinamiento lateral).....	520
FIGURA 13.27.	Perfiles típicos de estructuras de pavimento con adoquines de concreto. a) base asfáltica; b) BTC; c) base granular .....	526
FIGURA 13.28.	Nomogramas de diseño para adoquines de concreto apoyados sobre: a) BA, b) BTC y c) BG	
FIGURA 13.29.	Estimación del espesor de BA para solucionar el ejercicio.....	528
FIGURA 13.30.	Estimación del espesor de BTC para solucionar el ejercicio.....	529
FIGURA 13.31.	Estimación del espesor de base granular para solucionar el ejercicio.....	529



# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1.	Clasificación del CA por viscosidad.....	3
TABLA 1.2.	Requisitos mínimos de calidad del CA .....	4
TABLA 1.3.	Requisitos mínimos de calidad del CA .....	4
TABLA 1.4.	Requisitos mínimos de calidad del CA modificado.....	18
TABLA 1.5.	Requisitos mínimos de calidad del CA modificado.....	19
TABLA 1.6.	Requisitos mínimos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas.....	22
TABLA 1.7.	Requisitos mínimos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas.....	23
TABLA 1.8.	Requisitos mínimos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas.....	26
TABLA 1.9.	Requisitos mínimos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas.....	27
TABLA 1.10.	Requisitos mínimos de calidad exigidos a asfaltos líquidos para utilizar como imprimantes.....	28
TABLA 2.1.	Categorías de tránsito de acuerdo con INVIAS (2020) y con IDU (2018) .....	34
TABLA 2.2.	Granulometría del agregado pétreo para MAF .....	39

TABLA 2.3.	Caracterización de los agregados gruesos para mezclas MAF .....	40
TABLA 2.4.	Valores especificados de resistencia al deslizamiento para MAF .....	42
TABLA 2.5.	Valores máximos admisibles de IRI (m/km).....	42
TABLA 2.6.	Granulometría del agregado pétreo para MAC.....	43
TABLA 2.7.	Caracterización de los agregados gruesos para mezclas MAC.....	44
TABLA 2.8.	Tolerancias granulométricas para agregados de MAC .....	45
TABLA 2.9.	Granulometría del agregado pétreo para MDF .....	46
TABLA 2.10.	Caracterización de los agregados para mezclas MDF.....	47
TABLA 2.11.	Recomendación de utilización de MDF según espesor y tipo de capa.....	50
TABLA 2.12.	Valores especificados de resistencia al deslizamiento con el péndulo para MDF.....	50
TABLA 2.13	Valores máximos admisibles de IRI (m/km).....	51
TABLA 2.14.	Granulometría de mezclas de concreto asfáltico .....	52
TABLA 2.15.	Caracterización de los agregados para mezclas MDC, MSC, MGC.....	53
TABLA 2.16	Caracterización de los agregados para mezclas MAM .....	55
TABLA 2.17.	Criterios para diseño de concreto asfáltico (ensayo Marshall).....	56
TABLA 2.18.	Criterios de diseño de concreto asfáltico (ensayo Marshall) .....	57
TABLA 2.19.	Recomendación de utilización de concreto asfáltico según espesor y tipo de capa .....	59
TABLA 2.20.	Valores especificados de resistencia al deslizamiento con el péndulo para concreto asfáltico.....	62
TABLA 2.21.	Valores máximos admisibles de IRI (m/km).....	63
TABLA 2.22.	Granulometría de mezcla SAA-10.....	64
TABLA 2.23.	Caracterización de los agregados para mezclas SAA .....	64
TABLA 2.24.	Valores de resistencia al deslizamiento con el péndulo para SAA .....	65
TABLA 2.25.	Granulometría de mezclas TSS.....	66
TABLA 2.26.	Granulometría de mezclas TSD .....	66
TABLA 2.27.	Caracterización de los agregados para mezclas TSS y TSD .....	67
TABLA 2.28.	Valores especificados de resistencia al deslizamiento con péndulo para TSS y TSD .....	68

TABLA 2.29.	Granulometría de mezclas LA.....	69
TABLA 2.30.	Caracterización de los agregados para mezclas LA.....	70
TABLA 2.31.	Valores especificados de resistencia al deslizamiento con el péndulo para LA.....	71
TABLA 2.32.	Profundidad de textura mediante círculo de arena.....	71
TABLA 2.33.	Granulometría de mezclas MD.....	72
TABLA 2.34.	Caracterización de los agregados para mezclas MD.....	73
TABLA 2.35.	Valores máximos admisibles de IRI (m/km).....	74
TABLA 2.36.	Granulometría de mezclas M y F.....	75
TABLA 2.37.	Caracterización de los agregados para mezclas M y F.....	75
TABLA 2.38.	Coefficiente de resistencia al deslizamiento y textura superficial.....	77
TABLA 2.39.	Valores máximos admisibles de IRI (m/km).....	77
TABLA 2.40.	Requerimientos de especímenes para WMA.....	91
TABLA 2.41.	Valores mínimos de número de flujo para WMA.....	93
TABLA 2.42.	Granulometría de agregados reciclados.....	97
TABLA 2.43.	Caracterización de los agregados de adición para mezclas RAP en frío.....	97
TABLA 2.44.	Caracterización de los agregados que se van a adicionar para mezclas RAP en caliente.....	99
TABLA 2.45.	Granulometría de agregados para BEE.....	100
TABLA 2.46.	Caracterización de los agregados para BEE-25 y BEE-38.....	101
TABLA 2.47.	Granulometría de bases granulares no tratadas.....	103
TABLA 2.48.	Requisitos mínimos de calidad de agregado pétreo para base granular.....	104
TABLA 2.49.	Granulometría de agregados para MAN.....	106
TABLA 2.50.	Caracterización de los agregados combinados para MAN.....	106
TABLA 2.51.	Parámetros recomendados por INVIAS (2007) para capas de rodadura conformadas por una mezcla asfáltica tipo MDC-2.....	108
TABLA 2.52.	Parámetros recomendados por el IDU (2002) para capas de rodadura conformadas por una mezcla asfáltica casa y para capas de base asfáltica conformadas por una mezcla asfáltica tipo 1.....	108
TABLA 2.53.	Valores máximos recomendados de módulo resiliente (E) para capas de rodadura, base asfáltica y mezclas de alto módulo.....	109

TABLA 3.1.	Factores que afectan el fenómeno de ahuellamiento en mezclas asfálticas .....	113
TABLA 3.2.	Criterio de rigidez de mezclas en ensayos de <i>creep</i> para evitar el fenómeno de ahuellamiento en mezclas asfálticas .....	114
TABLA 3.3.	Límites admisibles de deformación.....	114
TABLA 3.4.	Coefficientes de la ecuación 3.1., propuestos por diversos investigadores .....	142
TABLA 3.5.	Comparación de los ensayos bajo esfuerzo controlado y los de deformación controlada.....	163
TABLA 3.6.	Posible variación de la pendiente de la línea que relaciona la deformación y el número de ciclos de falla de las mezclas que presentan comportamiento no lineal.....	174
TABLA 3.7.	Coefficientes de regresión de la ecuación 3.28.....	185
TABLA 4.1.	Número de giros en el SGC.....	198
TABLA 4.2.	Requerimientos volumétricos de SUPERPAVE.....	198
TABLA 4.3.	Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 19 mm.....	200
TABLA 4.4.	Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm.....	201
TABLA 4.5.	Clasificación del asfalto por el valor $J_{nr}$ (FHWA).....	206
TABLA 4.6.	Condiciones para pruebas SUPERPAVE .....	210
TABLA 5.1.	Métodos utilizados para evaluar envejecimiento de mezclas.....	217
TABLA 6.1.	Caracterización del MDR .....	254
TABLA 6.2.	Clasificación del PCI .....	254
TABLA 6.3.	Valores máximos admisibles de IRI (m/km) .....	256
TABLA 6.4.	Valores máximos admisibles de IRI (m/km) para MD.....	256
TABLA 6.5.	Caracterización del IRI .....	257
TABLA 6.6.	Caracterización del PSI .....	259
TABLA 6.7.	Clasificación funcional de la vía a través del OPI.....	260
TABLA 6.8.	Valores especificados de resistencia al deslizamiento con el péndulo para concreto asfáltico.....	261
TABLA 6.9.	Clasificación de la capacidad estructural del pavimento.....	267
TABLA 6.10.	Criterio de la Bureau Reclamation (USA) para tipificar el potencial de expansión de un suelo.....	269
TABLA 6.11.	Criterio de la Norma Sismoresistente Colombiana NSR-10 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (2010).....	269

TABLA 6.12.	Potencial de expansión de un suelo en función del IP, LC y LL .....	269
TABLA 6.13.	Potencial de expansión de un suelo en función del IP y LL.....	269
TABLA 7.1.	Características del GCR.....	277
TABLA 7.2.	Granulometría del GCR.....	277
TABLA 7.3.	Especificación de asfalto modificado con GCR.....	277
TABLA 7.4.	Valores recomendados para modificar el CA con el GCR.....	278
TABLA 7.5.	Especificación de asfalto modificado con GCR.....	278
TABLA 7.6.	Granulometría de mezclas asfálticas modificadas con GCR por vía húmeda .....	278
TABLA 7.7.	Criterios de diseño.....	279
TABLA 7.8.	Criterios de diseño (IDU, 2018).....	279
TABLA 7.9.	Análisis del costo del ciclo de vida de mezclas asfálticas con GCR y sin modificación .....	286
TABLA 7.10.	Estado de la red vial nacional.....	287
TABLA 7.11.	Peso máximo permitido, porcentaje de excedidos y peso máximo registrado de camiones tipo C2 en cinco vías colombianas .....	288
TABLA 7.12.	Peso máximo permitido, porcentaje de excedidos y peso máximo registrado de camiones tipo C3 en cinco vías colombianas.....	288
TABLA 8.1.	Granulometría para bases granulares no tratadas.....	298
TABLA 8.2.	Requisitos mínimos de calidad de agregados pétreos gruesos para bases granulares acordes.....	299
TABLA 8.3.	Granulometría para subbases granulares no tratadas.....	300
TABLA 8.4.	Requisitos mínimos de calidad de agregados pétreos gruesos para subbases granulares acordes.....	301
TABLA 8.5.	Granulometría para afirmados .....	303
TABLA 8.6.	Requisitos mínimos de calidad de agregados pétreos gruesos para afirmados .....	303
TABLA 8.7.	Requisitos mínimos de calidad de agregados pétreos gruesos y finos para materiales de conformación .....	305
TABLA 8.8.	Valores reportados de los parámetros a y b de la ecuación 8.2.....	306
TABLA 8.9.	Valores de presión y penetración de la muestra patrón.....	308
TABLA 8.10.	Percentiles para determinar el CBR de la subrasante.....	309
TABLA 8.11.	Percentiles para determinar el CBR de la subrasante.....	309

TABLA 8.12.	Clasificación del suelo de acuerdo con el CBR.....	309
TABLA 8.13.	Valores de módulo resiliente en función del CBR (valor relativo de soporte - VRS para México), clasificación del suelo (AASHTO y USC), módulo de reacción de la subrasante ( $K$ ) y peso unitario seco ( $\gamma_d$ ).....	315
TABLA 8.14.	Coefficientes de ajuste .....	317
TABLA 8.15.	Valores típicos de $M_r$ para materiales granulares.....	319
TABLA 8.16.	Criterio de la <i>Bureau Reclamation</i> (USA) para tipificar el potencial de expansión de un suelo.....	320
TABLA 8.17.	Criterio de la Norma Sismoresistente Colombiana NSR-10 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS (2010) .....	321
TABLA 8.18.	Potencial de expansión de un suelo en función del IP, el LC y el LL .....	321
TABLA 8.19.	Potencial de expansión de un suelo en función del IP y del LL .....	321
TABLA 9.1.	Peso máximo permitido, porcentaje de excedidos y peso máximo registrado de camiones tipo C2 en cinco vías colombianas.....	328
TABLA 9.2.	Peso máximo permitido, porcentaje de excedidos y peso máximo registrado de camiones tipo C3 en cinco vías colombianas.....	328
TABLA 10.1.	Esfuerzos recomendados para determinar el $M_r$ en suelos finos .....	341
TABLA 12.1.	Composición química típica del cemento hidráulico .....	422
TABLA 12.2.	Dimensión recomendada de los pasadores, dovelas o barras de transferencia.....	432
TABLA 12.3.	Dimensión recomendada de la barra de anclaje. H, L, AC y S son el espesor de la losa, la longitud de la barra, el ancho del carril y la separación entre barras, respectivamente .....	433
TABLA 12.4.	Granulometría de agregado fino para concreto hidráulico de pavimentos rígidos .....	440
TABLA 12.5.	Granulometría del agregado grueso para concreto hidráulico de pavimentos rígidos .....	441
TABLA 12.6.	Caracterización de los agregados gruesos .....	442

TABLA 12.7.	Parámetros mecánicos de concretos hidráulicos según RSV (2000) (IDU, 2002). $\sigma_6$ y $b$ son el esfuerzo para que el material falle al millón de ciclos de carga en un ensayo de fatiga bajo esfuerzo controlado y la pendiente de la ley de fatiga, respectivamente.....	443
TABLA 12.8.	Granulometría de mezclas de concreto para base .....	443
TABLA 12.9.	Requisitos mínimos de calidad de agregado pétreo para mezclas de concreto para base .....	444
TABLA 12.10.	Granulometría recomendada para bases estabilizadas con cemento hidráulico.....	445
TABLA 12.11.	Requisitos mínimos de calidad del agregado pétreo para MGTC.....	446
TABLA 12.12.	Granulometría recomendada para bases estabilizadas con cemento hidráulico.....	447
TABLA 12.13.	Granulometría recomendada para la arena de sello .....	450
TABLA 12.14.	Granulometría recomendada para la capa de arena.....	450
TABLA 13.1.	Espesores recomendados de sustitución de subrasante para alcanzar CBR de plataforma mínimo de 5 %.....	454
TABLA 13.2.	Distribución de vehículos, ejes y factores daño de 8.2 ton.....	456
TABLA 13.3.	Tipos de ejes y pesos máximos permitidos .....	459
TABLA 13.4.	Distribución de vehículos, ejes y coeficiente de agresividad en ejes de 13 ton.....	461
TABLA 13.5.	Proyección del TPDS al año 2023.....	464
TABLA 13.6.	Distribución de ejes por carga.....	464
TABLA 13.7.	Ejemplo de cálculo del FC .....	465
TABLA 13.8.	Ejemplo de cálculo del CAM.....	466
TABLA 13.9.	Coefficientes y módulo recomendados para distintos $f_c^9$ (medidos a los 7 días) de bases tratadas con cementantes hidráulicos .....	472
TABLA 13.10.	Serviciabilidad final, $P_f$ .....	473
TABLA 13.11.	Calidad del drenaje.....	474
TABLA 13.12.	Valores de $m_i$ recomendados para corregir los coeficientes estructurales de bases y subbases granulares .....	474
TABLA 13.13.	Coefficientes de drenaje de las capas granulares no tratadas $m_i$ .....	474
TABLA 13.14.	Niveles de confiabilidad $R$ recomendados.....	475

TABLA 13.15.	Algunos valores de fractil de la ley normal centrada, $z_r$ .....	475
TABLA 13.16.	Error normal combinado, $S_o$ .....	475
TABLA 13.17.	Espesores mínimos de capas .....	476
TABLA 13.18.	Valores de $K$ cuando la losa se apoya sobre una capa granular o una capa estabilizada con cementante hidráulico ....	479
TABLA 13.19.	Serviciabilidad final, $P_f$ .....	479
TABLA 13.20.	Valores de $P_f$ recomendados .....	480
TABLA 13.21.	Clasificación del tipo de tránsito .....	482
TABLA 13.22.	Módulo para capas granulares no tratadas.....	484
TABLA 13.23.	Valores recomendados de módulo para capas de rodadura y base asfáltica .....	485
TABLA 13.24.	Niveles de $P_f$ recomendados .....	485
TABLA 13.25.	Fractil $u$ .....	485
TABLA 13.26.	Clasificación de la subrasante, INVIAS (2008).....	502
TABLA 13.27.	Categorías de tránsito, INVIAS (2008) .....	502
TABLA 13.28.	Clasificación del módulo de rotura de la losa de concreto, INVIAS (2008) .....	502
TABLA 13.29.	Espesores de losa de concreto en cm, para tráfico T0 (INVIAS, 2008) .....	503
TABLA 13.30.	Espesores de losa de concreto en cm, para tráfico T1 (INVIAS, 2008) .....	503
TABLA 13.31.	Espesores de losa de concreto en cm, para tráfico T2 (INVIAS, 2008) .....	504
TABLA 13.32.	Espesores de losa de concreto en cm, para tráfico T3 (INVIAS, 2008) .....	504
TABLA 13.33.	Espesores de losa de concreto en cm, para tráfico T4 (INVIAS, 2008) .....	504
TABLA 13.34.	Espesores de losa de concreto en cm, para tráfico T5 (INVIAS, 2008) .....	505
TABLA 13.35.	Espesores de losa de concreto en cm, para tráfico T6 (INVIAS, 2008) .....	505
TABLA 13.36.	Estimación del factor carril $k_2$ .....	507
TABLA 13.37.	Estimación de $k_3$ para la proyección de tráfico .....	508
TABLA 13.38.	Esfuerzo equivalente en MPa (losas sin confinamiento lateral) - eje simple/eje tándem.....	509
TABLA 13.39.	Esfuerzo equivalente en MPa (losas con confinamiento lateral) - eje simple/eje tándem.....	510

TABLA 13.40.	Esfuerzo equivalente en MPa para ejes trídem - Losas con y sin confinamiento lateral (CC y SC, respectivamente).....	510
TABLA 13.41.	Simulador para diseño por fatiga para pavimentos rígidos - Sin apoyo lateral (SC) .....	512
TABLA 13.42.	Simulador para diseño por fatiga para pavimentos rígidos - Con apoyo lateral (CC).....	512
TABLA 13.43.	Factor de erosión (juntas con pasadores y losas sin confinamiento lateral) - Eje simple/eje tándem.....	514
TABLA 13.44.	Factor de erosión (juntas sin pasadores y losas sin confinamiento lateral) - Eje simple/eje tándem.....	514
TABLA 13.45.	Factor de erosión (juntas con pasadores y losas con confinamiento lateral) - Eje simple/eje tándem .....	515
TABLA 13.46.	Factor de erosión (juntas sin pasadores y losas con confinamiento lateral) - Eje simple/eje tándem .....	515
TABLA 13.47.	Factor de erosión para ejes trídem, juntas con pasadores - Losas con y sin confinamiento lateral (CC y SC, respectivamente) .....	516
TABLA 13.48.	Factor de erosión para ejes trídem, juntas sin pasadores - Losas con y sin confinamiento lateral (CC y SC, respectivamente) .....	516
TABLA 13.49.	Distribución del número de ejes por día para el ejercicio.....	521
TABLA 13.50.	Variable tránsito para el ejercicio didáctico .....	522
TABLA 13.51.	Definición de la variable tránsito para el ejercicio didáctico .....	522
TABLA 13.52.	Cálculo del número de ejes admisibles por fatiga .....	522
TABLA 13.53.	Análisis de fatiga (primera iteración).....	523
TABLA 13.54.	Análisis de fatiga (segunda iteración) .....	523
TABLA 13.55.	Cálculo del número de admisibles por erosión .....	524
TABLA 13.56.	Análisis por erosión (primera iteración) .....	524
TABLA 13.57.	Análisis por erosión (segunda iteración).....	524
TABLA 13.58.	Análisis por erosión (tercera iteración) .....	525



# INTRODUCCIÓN

## Síntesis y alcance

El presente documento técnico trata los aspectos más importantes que el ingeniero debe conocer a la hora de diseñar, construir, controlar e investigar pavimentos, tanto para carreteras, como para vías urbanas. Se excluyen aspectos específicos concernientes a pavimentos para aeropistas y vías peatonales, aunque muchos de los conceptos y fundamentos que rigen estas estructuras son similares a los que se reportan en la presente obra.

En términos generales, la presente obra se divide en cuatro secciones:

- **Sección 1.** Los capítulos 1 al 7 tratan todos aquellos aspectos concernientes a los materiales asfálticos (asfaltos y mezclas asfálticas).

Con base en una amplia revisión bibliográfica, se describen en los capítulos 1 y 2 los diferentes tipos de ligantes y mezclas asfálticas que se fabrican en Colombia y en el mundo. Asimismo, se reportan las especificaciones, las pruebas de laboratorio y las propiedades que el ingeniero de pavimentos debe conocer sobre estos materiales cuando realice trabajos de diseño, construcción, consultoría y/o interventoría.

En el capítulo 3 se describen de manera detallada tres de los cuatro principales mecanismos de falla de estructuras de pavimento flexible: la fatiga, el ahuellamiento y el daño por humedad. La fatiga es asociada a la respuesta resiliente de la estructura y el ahuellamiento, a la acumulación de deformaciones permanentes en la dirección vertical. Estos dos mecanismos se producen por las cargas cíclicas impuestas por el parque automotor. La ingeniería de pavimentos ha venido desarrollando investigaciones en todo el mundo con el fin de entender el complejo comportamiento viscoelastoplástico que experimentan las mezclas asfálticas bajo diversas trayectorias de cargas cíclicas y condiciones del medio ambiente. En lo

que respecta al estado del conocimiento en esta área, a pesar del amplio número de investigaciones realizadas, el comportamiento viscoelastoplástico que experimentan mezclas asfálticas en servicio aún no ha sido totalmente entendido. En Colombia, la bibliografía sobre el tema es escasa y no ha sido ampliamente presentada en ningún libro sobre pavimentos o en memorias técnicas. Por lo anterior, en este capítulo se presenta la forma como han sido estudiados los fenómenos de ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas, los ensayos más utilizados para medir y evaluar estos mecanismos de daño, los factores que influyen en su generación y las ecuaciones empíricas más utilizadas en el mundo para describirlas. Al final del capítulo se describe de manera resumida el mecanismo de daño por humedad.

En el capítulo 4 se presenta la forma como se diseñan mezclas de concreto asfáltico a través de la metodología SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavements*). El capítulo 5 muestra la evolución histórica de los estudios que se han desarrollado en el mundo para evaluar el efecto del envejecimiento y de la oxidación de asfaltos y mezclas asfálticas (revisión del estado del conocimiento) sobre la durabilidad de estructuras de pavimentos flexibles o con capas asfálticas.

En el capítulo 6 se presentan los deterioros superficiales que se deben medir sobre capas asfálticas durante la vida útil del pavimento, con el fin de evaluar y valorar su estado funcional y de servicio.

Por último, en el capítulo 7, se presenta una revisión del estado del conocimiento de la forma como ha sido estudiada la tecnología de los asfaltos y de las mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho triturado de llanta (GCR). También se realiza un análisis de su posible utilización en Colombia. Asimismo, se sintetizan las ventajas y desventajas técnicas, económicas y ambientales de utilizar el GCR como modificador de asfaltos y/o mezclas asfálticas.

- **Sección 2.** Los capítulos 8 al 11 tratan todos aquellos aspectos concernientes a los materiales granulares no tratados de base, subbase, subrasante mejorada (suelos artificiales contruidos por el hombre en proyectos de pavimentación vial) y la subrasante.

Por lo general, las estructuras de pavimento están conformadas por una capa superficial ligada o tratada con algún cementante asfáltico o hidráulico, apoyada sobre capas compuestas por materiales granulares no tratados (base, subbase y/o subrasante mejorada), las cuales, a su vez, se apoyan sobre la subrasante o terreno natural de cimentación. Dentro del pavimento las capas granulares conforman la parte más voluminosa de la estructura, tienen como función principal ayudar a soportar los esfuerzos que transmiten las cargas vehiculares y distribuirlos a la subrasante en magnitudes que sean tolerables por esta. A su vez, estas capas controlan en gran parte las deformaciones elastoplásticas asociadas con los fenómenos de fatiga y ahuellamiento en las mezclas asfálticas (Dawson y Plaistow, 1993; Li y Selig, 1994; Frost *et al.*, 2004) y de erosión en los pavimentos rígidos, ayudan a controlar el flujo de agua hacia la subrasante y facilitan los procesos constructivos.

Por todo lo anteriormente mencionado, los materiales granulares no tratados en un pavimento juegan un papel importante a la hora de estimar la dimensión del pavimento (diseño) y controlar su vida útil. La capa granular de un pavimento vial urbano, por lo general, se conforma por la base, la subbase y/o la subrasante mejorada (esta última puede estar, a su vez, conformada por un material de con-

formación, rajón o escombros). En vías rurales, adicionalmente, puede llegar a necesitarse la extensión de capas de afirmado y terraplén. Por lo general estas capas se componen de agregados pétreos friccionantes y, en muchas ocasiones, la subrasante contiene agregados con partículas finas (cohesivos). Ambos tipos de materiales (friccionantes o cohesivos) experimentan comportamientos diferentes bajo carga monotónica y cíclica en un pavimento.

Múltiples estudios desarrollados desde la década de los sesenta han demostrado que las capas granulares contribuyen en gran parte a controlar los mecanismos de daño que se generan en estructuras viales. Por tal motivo, la ingeniería de pavimentos ha venido desarrollando investigaciones en el mundo con el fin de entender el complejo comportamiento elastoplástico que experimentan estos materiales bajo diversas trayectorias de cargas cíclicas y condiciones del medio ambiente.

En lo que respecta al estado del conocimiento en esta área, a pesar del amplio número de investigaciones realizadas, el comportamiento elastoplástico de materiales granulares aún no ha sido totalmente entendido. En Colombia se han realizado pocas investigaciones sobre el tema, debido, principalmente, a la falta de equipos apropiados para llevar a cabo mediciones de laboratorio e *in situ*, así como a la escasez de investigadores. Incluso, al igual que en los asfaltos y las mezclas asfálticas, la bibliografía sobre el tema es escasa y no ha sido ampliamente presentada en libros sobre pavimentos o en memorias técnicas.

En el capítulo 8 se describen cada una de las subcapas que conforman la capa de materiales granulares no tratados y, con base en una amplia revisión bibliográfica, se reporta en los capítulos 9 a 11 un estado del conocimiento sobre la forma como han sido estudiados, caracterizados y modelados matemáticamente los materiales que las conforman. Se discuten los factores que influyen en dicho comportamiento y, al final de cada capítulo, se presenta la evolución de las ecuaciones matemáticas desarrolladas más utilizadas en el mundo para predecir la rigidez y la deformación que experimentan materiales granulares bajo carga cíclica.

- **Sección 3.** El capítulo 12 trata todos aquellos aspectos concernientes a materiales granulares estabilizados con cementantes hidráulicos empleados en proyectos de pavimentación vial. Se reportan las especificaciones, las pruebas de laboratorio y las propiedades que el ingeniero de pavimentos debe conocer sobre estos materiales cuando realice trabajos de diseño, construcción, consultoría y/o interventoría. Se hace énfasis en la descripción de losas de concreto, con los respectivos elementos que la conforman, por ser el componente principal de estructuras de pavimento rígido. Asimismo, de manera resumida se presentan las especificaciones sobre bases de concreto, materiales estabilizados o tratados con cementantes hidráulicos, suelo-cemento y adoquines de concreto.
- **Sección 4.** El capítulo 13 trata todos aquellos aspectos concernientes al diseño de estructuras de pavimentos para carreteras y vías urbanas. Se describen las variables de diseño y los conceptos necesarios para que el ingeniero pueda diseñar estructuras de pavimentos flexibles, semirrígidas, rígidas y en adoquines de concreto por los métodos de la American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO) (1993); “Racional” del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y de la Universidad de Los Andes (2002); Portland Cement Association (PCA) (1984);

Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) (2008); Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI) (1995).

## Público objeto

El presente documento técnico sirve como fuente de consulta para estudiantes de pregrado y posgrado de ingeniería civil, geotecnia, vías y transporte en instituciones de educación superior que imparten la asignatura de pavimentos y afines. Consultores y diseñadores de pavimentos podrán enriquecer y profundizar sus conocimientos en los temas que atañen al contenido del presente documento. Adicionalmente, investigadores nacionales e internacionales de grupos y centros de investigación pueden tomar como referencia el documento para fortalecer el estado del conocimiento de las investigaciones que ejecuten sobre los materiales que conforman estructuras de pavimentos para carreteras y vías urbanas.

## Generalidades sobre pavimentos

Los pavimentos para carreteras y vías urbanas son estructuras viales multicapa, es decir, están constituidos por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales, compuestas por materiales seleccionados. Estas estructuras son diseñadas para soportar las cargas impuestas por el tránsito y por las condiciones ambientales (función estructural). Asimismo, deben diseñarse con el fin de ofrecer un paso cómodo, seguro y confortable al parque automotor que se imponga sobre su superficie en determinado período de tiempo (objetivo funcional). Las cargas dinámicas de los vehículos que transitan sobre estas estructuras producen esfuerzos cíclicos y deformaciones verticales, horizontales y de corte en las interfaces de las capas. El pavimento se soporta sobre una subrasante natural o sobre una plataforma, que puede ser la subrasante mejorada, estabilizada o un terraplén que se denomina capa de conformación.

A continuación se describen algunos tipos de estructuras de pavimento:

**Pavimento flexible.** Las estructuras de pavimento de este tipo pueden ser definidas como estructuras viales conformadas por una capa asfáltica apoyada sobre capas de menor rigidez, compuestas por materiales granulares no tratados o ligados (base, subbase, afirmado y, en algunos casos, subrasante mejorada o material de conformación), que a su vez se soportan sobre el terreno natural o subrasante (ver figura A). Los esfuerzos que generan las cargas vehiculares se disipan a través de cada una de las capas de la estructura de tal forma que, al llegar a la subrasante, la resistencia mecánica del suelo que la compone debe ser capaz de resistir dicho esfuerzo sin generar deformaciones que permitan el deterioro funcional o estructural de la vía. Adicionalmente, cada una de las capas de la estructura debe resistir la influencia del medio ambiente. La capa asfáltica en un pavimento flexible está conformada por la carpeta de rodadura, la base intermedia y la base asfáltica; sin embargo, esta capa puede estar constituida únicamente por la de rodadura cuando los niveles de tránsito son bajos. Las principales funciones de la capa asfáltica son las siguientes:

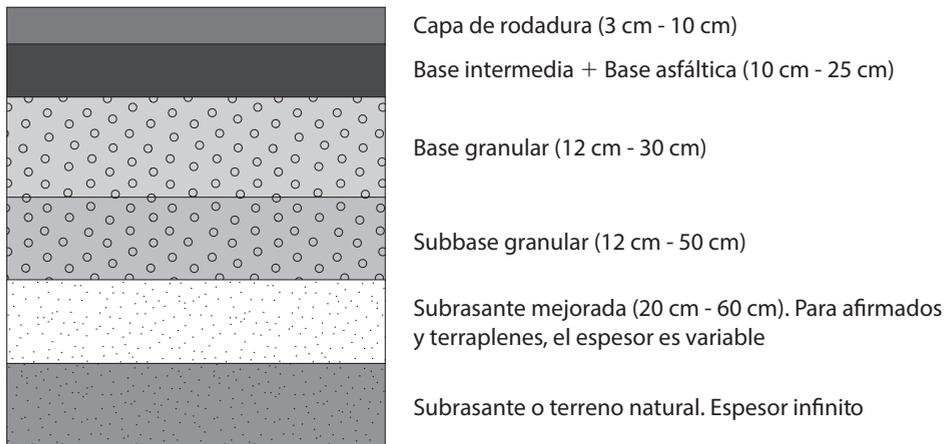
- **Estructural:** esta capa debe estar diseñada y construida de tal forma que sea resistente a los fenómenos de fatiga y acumulación de las deformaciones permanentes inducidas por las cargas cíclicas vehiculares que se repiten en el tiempo. Adicionalmente, debe resistir los efectos del clima.
- **Funcional:** esta capa recibe de manera directa las cargas que circulan sobre la superficie del pavimento, por lo tanto, debe estar diseñada y construida de tal manera que permita la circulación cómoda y segura del parque automotor durante su vida útil (serviciabilidad).

- **Impermeabilización:** esta capa impide la penetración directa del agua a las capas subyacentes, restringiendo la pérdida de resistencia al corte que pueden experimentar las capas granulares de base y subbase, así como la subrasante cuando se incrementa el grado de saturación de los materiales que la conforman.

Cada una de las capas que componen la carpeta asfáltica están compuestas por mezclas asfálticas, las cuales a su vez se componen de materiales granulares (agregado pétreo) seleccionados, ligados con un material asfáltico o asfalto. Estas mezclas están conformadas por lo general, por agregados pétreos con granulometría y requisitos mínimos de calidad diferentes. Asimismo, pueden presentar diferencias en cuanto a su función dentro de la estructura del pavimento y al tipo de material asfáltico o ligante que utilizan.

De acuerdo con la Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia (ASOPAC) (2004), la mayor parte de las estructuras que se diseñan y construyen en Colombia y en el mundo son flexibles o cuentan con rodaduras o superficies construidas con capas asfálticas. Según ellos, más del 90 % de las vías en el mundo y más del 65 % de las de Bogotá D.C., están construidas en pavimento asfáltico.

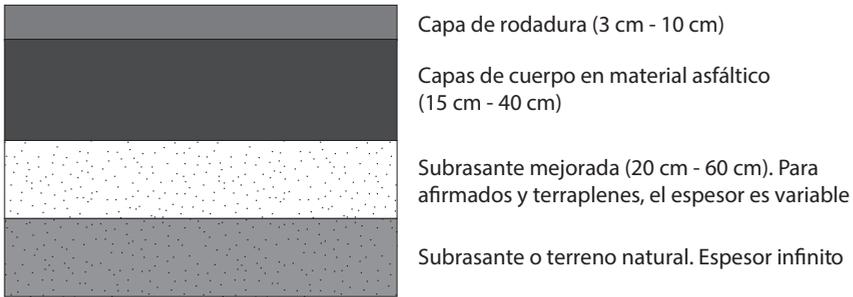
**Figura A. Perfil típico de una estructura de pavimento flexible**



Fuente: elaboración propia.

**Pavimentos con capas asfálticas gruesas.** Este tipo de estructura de pavimento se compone de una capa de rodadura asfáltica apoyada sobre materiales tratados con ligantes asfálticos (capa asfáltica gruesa). A su vez, dependiendo del tipo de subrasante, esta capa asfáltica gruesa se apoya sobre una subrasante mejorada, una capa de conformación o, directamente, sobre el terreno natural (ver figura B). La rigidez y la resistencia a la tensión de las capas construidas con materiales asfálticos, permiten que los esfuerzos verticales se repartan en el sentido horizontal y, en consecuencia, el esfuerzo vertical en la subrasante disminuye. Los esfuerzos inducidos por las cargas rodantes producen esfuerzos de flexo-tensión en la fibra inferior de las capas asfálticas. Los esfuerzos en el suelo de subrasante generalmente son bajos, de tal forma que no suelen producirse deformaciones permanentes en la superficie antes de que se presente la rotura por fatiga de las capas asfálticas.

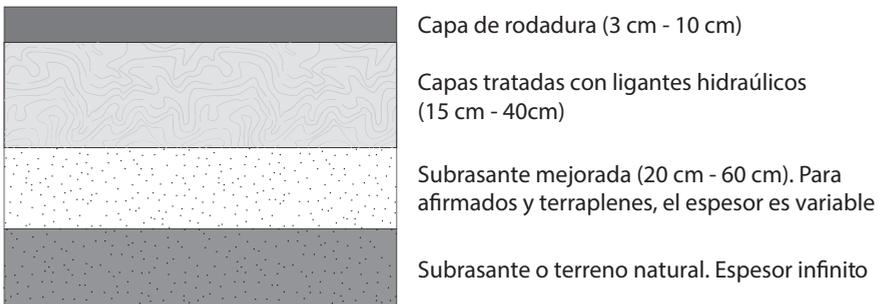
**Figura B. Perfil típico de una estructura de pavimento con capa asfáltica gruesa**



Fuente: elaboración propia.

**Pavimentos con capas tratadas con ligantes hidráulicos.** Están compuestos por una capa de rodadura asfáltica apoyada sobre un soporte de materiales tratados con ligantes hidráulicos en una o dos capas (base y subbase) (ver figura C). Teniendo en cuenta la rigidez de los materiales tratados con ligantes hidráulicos, los esfuerzos verticales transmitidos al soporte del pavimento, son bajos. Por el contrario, los esfuerzos en tracción por fatiga, por carga, que deben soportar las capas ligadas con cementantes hidráulicos son altos y son determinantes en el diseño del espesor de la estructura. Las capas tratadas con ligantes hidráulicos están sometidas a retracción por fraguado del material. Lo anterior induce fisuras en la dirección transversal del material. Generalmente, estas son individuales en el momento de su aparición, pero, posteriormente, se ramifican debido al tráfico. Por lo anterior, en este tipo de estructuras se deben tomar medidas constructivas para minimizar este inconveniente.

**Figura C. Perfil típico de una estructura de pavimento con capas tratadas con ligantes hidráulico**



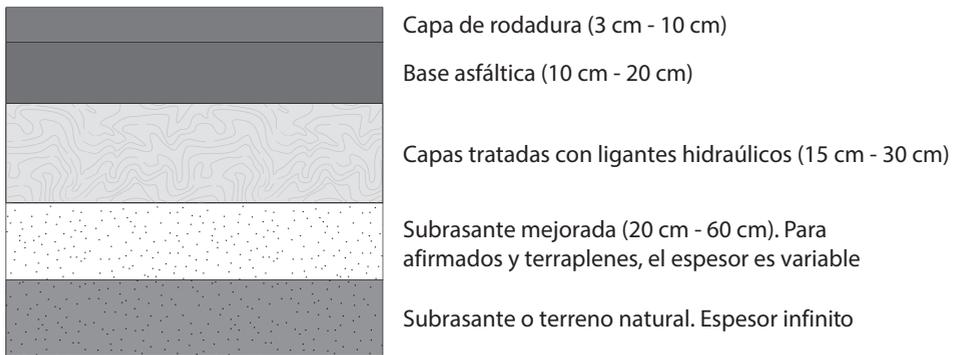
Fuente: elaboración propia.

**Estructuras de pavimentos mixtas.** Este tipo de estructura está constituida por una capa asfáltica (capa de rodadura + base asfáltica), apoyada sobre una capa granular tratada o ligada con materiales hidráulicos (ver figura D). En las estructuras mixtas se recomienda que el espesor de la capa asfáltica sea igual al de la capa tratada con cementantes hidráulicos. Esto con el fin de dar a la estructura de pavimento un espesor de capa asfáltica adecuado que evite que el calcado de fisuras que se genera en la capa tratada con cementante hidráulicos por retracción durante el proceso de fraguado llegue a la superficie.

La capa de materiales tratados con ligantes hidráulicos cumple con el oficio de subbase y su función, considerando su gran rigidez, es la de disipar los esfuerzos verticales que se transmi-

ten al suelo de subrasante. Esta capa permite garantizar que las deformaciones de la carpeta asfáltica sean bajas. Las capas asfálticas (generalmente son gravas bituminosas) cumplen con varios oficios. En primer lugar, permiten la buena regularidad del pavimento, además de retardar la aparición en la superficie de las fisuras transversales que se originan en la capa tratada con ligantes hidráulicos durante el proceso de retracción por fraguado. En una primera fase del funcionamiento de la estructura del pavimento, las distintas capas están ligadas y la capa tratada con ligante hidráulico está sometida a fatiga por carga por flexión. Luego, por efecto de los movimientos de dilatación diferencial entre la capa asfáltica y la tratada con ligantes hidráulicos, así como por la acción del tráfico, la adherencia de estas capas se rompe en ciertas zonas. Esto lleva a elevar los esfuerzos de tracción en la capa asfáltica que ocasiona la falla total de la estructura por fatiga al final de su vida de servicio.

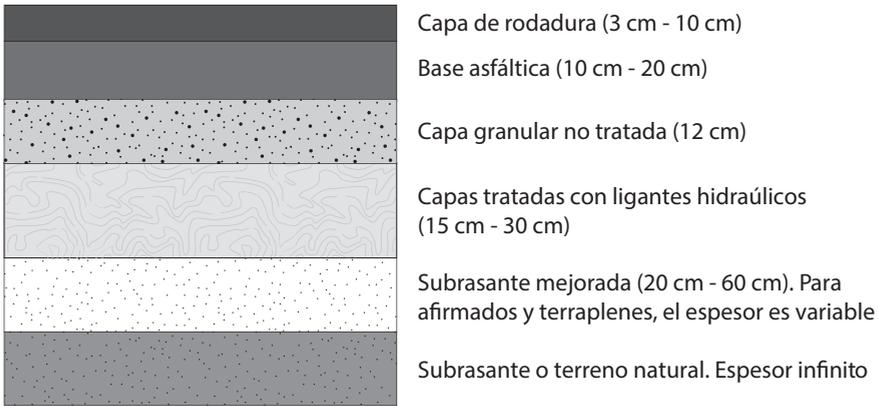
**Figura D. Perfil típico de una estructura de pavimento con estructura mixta**



Fuente: elaboración propia.

**Pavimentos con estructura inversa.** Este tipo de estructura es similar a la mixta descrita con anterioridad. La diferencia radica en que la capa asfáltica se separa de la capa tratada con ligantes hidráulicos por medio de una capa granular de 12 cm de espesor (ver figura E). Es una estructura de utilización relativamente reciente. La capa granular tratada con ligantes hidráulicos tiene como función principal atenuar los esfuerzos en el suelo de subrasante y proporcionar a las capas superiores un soporte de baja deformabilidad. La capa granular no tratada, relativamente deformable en el sentido horizontal, tiene como función evitar la propagación de las fisuras de la capa de materiales tratados con ligantes hidráulicos hacia la capa asfáltica. La cobertura en materiales asfálticos sirve para asegurar la continuidad y la impermeabilidad del pavimento.

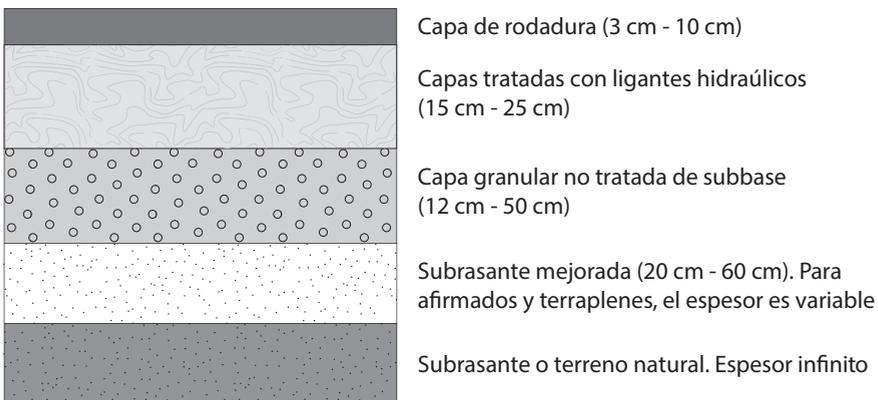
**Estructura de pavimento rígido.** Este tipo de estructura está compuesta generalmente por una capa o losa de concreto hidráulico de 18 a 30 cm de espesor, soportada sobre una capa granular no tratada o estabilizada con cementantes hidráulicos. La descripción de este tipo de estructura y un perfil típico se presenta en el apartado 12.1. Debido al valor del módulo elástico elevado del concreto, los esfuerzos inducidos por el tráfico son esencialmente atenuados en flexión por la losa de concreto y los esfuerzos de compresión se distribuyen en un área amplia y se transmiten a la subrasante en magnitudes muy pequeñas.

**Figura E. Perfil típico de una estructura de pavimento inversa**

Fuente: elaboración propia.

**Estructura de pavimento articulado o en adoquines.** Este tipo de estructura se conforma superficialmente de elementos individuales rígidos prefabricados denominados adoquines, los cuales se unen entre sí por un material sellante. Para retener los adoquines y el sello, se dispone de una capa de arena de 2.5 a 4 cm de espesor compacto. La plataforma de la capa de arena y adoquines puede ser la misma de las capas asfálticas en estructuras flexibles y semirrígidas. Una descripción más detallada de este tipo de estructura y un perfil típico se presentan en el apartado 12.5.

**Estructura de pavimento semirrígida.** Este tipo de estructura se conforma por una capa asfáltica apoyada sobre una capa de materiales estabilizados con cementantes hidráulicos, los cuales, a su vez, se soportan sobre capas granulares no tratadas de subbase y subrasante mejorada o natural (ver figura F).

**Figura F. Perfil típico de una estructura semirrígida**

Fuente: elaboración propia.