

# Pavimentos

Material es, construcción y diseño



ECO E  
EDICIONES

Hugo Alexander Rondón Quintana  
Fredy Alberto Reyes Lizcano

## Hugo Alexander Rondón Quintana

Ingeniero civil egresado de la Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta, Colombia). Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en infraestructura vial de la Universidad de los Andes gracias a una beca otorgada por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Doctor en Ingeniería (énfasis en geotecnia y pavimentos) de la Universidad de Los Andes (Colombia) gracias a dos becas otorgadas por Colciencias y el DAAD (Alemania). Se ha desempeñado como consultor e interventor de obras civiles, director de interventoría de vías, investigador en el Instituto de Mecánica de Suelos y Cimentaciones de la Ruhr Universität Bochum (Alemania). Catedrático en cursos de maestría y especialización en temas correspondientes a pavimentos.

Ponente en eventos nacionales e internacionales y autor de múltiples artículos en revistas indexadas nacionales e internacionales. Par evaluador de Colciencias. Participante activo como evaluador de múltiples revistas indexadas nacionales e internacionales. Par evaluador del Consejo Nacional de Acreditación – CNA. Actualmente es profesor asociado y emérito de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Investigador Senior ante Colciencias. Áreas de investigación: comportamiento de materiales granulares, asfaltos modificados, uso de materiales alternativos y ecuaciones constitutivas. Ganador de la III edición del Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo* otorgado por la Fundación Asociación Española de Carreteras – FAEC en Madrid (España) en noviembre del año 2010 por una investigación ejecutada en el área de materiales granulares para pavimentos. Ganador del Premio de Ingeniería *Diódoro Sánchez* otorgado el 1 de junio de 2012 por la Sociedad Colombiana de Ingenieros por haber publicado el mejor libro de ingeniería en el año 2011, título del libro *Pavimentos Flexibles*.

# Contenido

<b>Introducción</b> .....	XXV
<b>1. Materiales o ligantes asfálticos</b> .....	1
1.1 Cemento asfáltico .....	2
1.1.1 Generalidades .....	2
1.1.2 Rigidez del cemento asfáltico .....	17
1.1.3 Estructura fisico-química .....	18
1.2 Cemento asfáltico modificado .....	19
1.3 Emulsiones asfálticas .....	22
1.4 Asfaltos líquidos, rebajados o <i>cut-back</i> .....	31
1.5 Asfaltos espumados .....	32
1.6 Crudo de Castilla.....	32
1.7 Asfaltos naturales.....	33
<b>2. Mezclas asfálticas</b> .....	37
2.1 Generalidades.....	37
2.2 Agregados pétreos.....	38
2.3 Mezcla asfáltica abierta en frío .....	44
2.4 Mezcla asfáltica abierta en caliente.....	48
2.5 Mezcla asfáltica densa en frío.....	51
2.6 Concreto asfáltico .....	56
2.7 Mezclas de arena - asfalto.....	70
2.8 Tratamientos superficiales.....	71
2.9 Lechadas asfálticas ( <i>slurry and seal</i> ).....	74
2.10 Mezcla asfáltica drenante .....	76
2.11 Mezclas discontinuas en caliente o microaglomerados.....	79
2.12 Mezclas tibias .....	82
2.13 Mezclas asfálticas modificadas .....	103
2.14 Mezclas asfálticas recicladas en frío .....	106
2.15 Mezclas asfálticas recicladas en caliente.....	108
2.16 Bases estabilizadas con emulsión .....	110
2.17 Base o granular estabilizado con asfalto en caliente .....	113
2.18 Granular estabilizado con crudo de Castilla .....	115
2.19 Rigidez de mezclas asfálticas .....	118
<b>3. Mecanismos de daño de mezclas asfálticas para el diseño</b> .....	123
3.1 Ahuellamiento en mezclas asfálticas.....	123
3.1.1 Generalidades .....	123
3.1.2 Ensayos y equipos.....	127
3.1.3 Factores que afectan la resistencia a la deformación permanente.....	138



3.1.4 Ecuaciones para la predicción de la deformación permanente.....	159
3.2 Fatiga en mezclas asfálticas.....	165
3.2.1 Generalidades.....	165
3.2.2 Ensayos.....	168
3.2.3 Factores que afectan la resistencia a fatiga.....	179
3.2.4 Ecuaciones empíricas.....	212
3.3. Daño por humedad.....	222
<b>4. SUPERPAVE.....</b>	<b>225</b>
4.1 Generalidades.....	225
4.2. Niveles de diseño.....	226
4.3. Diseño de mezcla.....	230
4.4. Ensayos para evaluar el comportamiento de la mezcla diseñada.....	241
<b>5. Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas: estado del conocimiento.....</b>	<b>243</b>
5.1. Generalidades.....	243
5.2. Algunos estudios reportados.....	249
<b>6. Evaluación de pavimentos.....</b>	<b>265</b>
6.1. Inventario de daños.....	265
6.1.1. Fisuras.....	265
6.1.2 Deformaciones.....	274
6.1.3 Pérdida de las capas de la estructura.....	277
6.1.4 Daños superficiales.....	280
6.1.5 Otros.....	284
6.2 Inspección de obras de drenaje.....	286
6.3 Estado superficial a través del MDR.....	286
6.4 Determinación del PCI.....	291
6.5 Determinación de la irregularidad superficial.....	292
6.6 Determinación del PSI.....	297
6.7 Determinación del OPI.....	298
6.8 Determinación de la textura superficial.....	298
6.9 Evaluación estructural.....	301
6.9.1 Medidas de deflexión – Ensayos no destructivos.....	301
6.10 Ensayos destructivos.....	306
6.11 Determinación de la capacidad estructural.....	307
6.12 Exploración geotécnica.....	307
6.13 Medición de ruido.....	309
<b>7. Asfaltos modificados con caucho: estudio de su aplicación en Colombia.....</b>	<b>313</b>
7.1 Introducción.....	313
7.2 Generalidades.....	315
7.3 Especificaciones colombianas.....	317
7.4 Ventajas de la utilización del asfalto-GCR.....	320
7.5 Desventajas de la utilización del asfalto-GCR.....	325

7.6 Justificación de utilización en Colombia de mezclas asfálticas modificadas con GCR.....	326
Anexo A. Ficha técnica del crudo de Castilla .....	333
Anexo B. Especificación PG (AASHTO MP 1) .....	338
<b>8. Capas granulares: generalidades .....</b>	<b>339</b>
8.1 Base granular .....	339
8.2 Subbase granular.....	341
8.3 Controles constructivos de bases y subbases.....	342
8.4 Afirmados .....	343
8.5 Subrasante mejorada.....	345
8.6 Subrasante.....	348
8.6.1 CBR ( <i>Californian Bearing Ratio</i> ).....	348
8.6.2 Penetrómetro dinámico de cono (PDC).....	352
8.6.3 Prueba de placa .....	353
8.6.4 Módulo resiliente.....	355
8.6.5 Estudios adicionales .....	361
<b>9. Aspectos para tener en cuenta de los granulares en los métodos de diseño flexible .....</b>	<b>365</b>
9.1 Metodologías de diseño de pavimentos flexibles y especificaciones de materiales .....	366
9.1.1 Métodos de diseño empíricos .....	366
9.1.2 Métodos de diseño analíticos, mecanicistas o racionales.....	373
9.2 Nuevos métodos de análisis de pavimentos .....	376
9.2.1 Programas de elementos finitos (FEM).....	376
9.2.2 Programas de elementos discretos (DEM) .....	379
<b>10. Comportamiento resiliente de materiales granulares .....</b>	<b>383</b>
10.1 Módulo resiliente. ....	384
10.2 Factores que influyen en el comportamiento resiliente de materiales granulares gruesos.....	390
10.2.1 Influencia del esfuerzo .....	391
10.2.2 Influencia del contenido de agua .....	397
10.2.3 Influencia de la densidad.....	400
10.2.4 Influencia de la granulometría, tamaño máximo, cantidad de finos y forma de la partícula.....	401
10.2.5 Influencia del número, frecuencia de carga e historia de esfuerzo.....	407
10.2.6 Influencia del tipo de ensayo .....	408
10.2.7 Anisotropía.....	410
10.3 Ecuaciones resilientes (elásticas no lineales) para materiales granulares gruesos .....	414
10.4 Factores que influyen en el comportamiento resiliente de materiales fino-granulares .....	423
10.4.1 Influencia del esfuerzo .....	423
10.4.2 Influencia del contenido de agua .....	426



10.4.3 Influencia de la densidad.....	430
10.5 Ecuaciones resilientes (elásticas no lineales) para materiales fino-granulares.....	432
10.6 Síntesis .....	440
<b>11. Deformación permanente en materiales granulares no tratados .....</b>	<b>443</b>
11.1 Deformación permanente.....	443
11.2 Factores que influyen en la resistencia a la deformación permanente de materiales granulares gruesos .....	444
11.2.1 Influencia del esfuerzo .....	444
11.2.2 Influencia de la historia de esfuerzo.....	451
11.2.3 Influencia del contenido de agua .....	452
11.2.4 Influencia de la densidad.....	456
11.2.5 Influencia del número y frecuencia de carga .....	458
11.2.6 Influencia de la granulometría, tamaño máximo, cantidad de finos y forma de la partícula .....	460
11.2.7 Influencia del tipo de ensayo .....	464
11.3 Ecuaciones de deformación permanente para materiales granulares gruesos .....	468
11.4 Factores que influyen en la resistencia a la deformación permanente de materiales fino-granulares.....	475
11.4.1 Influencia del esfuerzo .....	475
11.4.2 Influencia del contenido de agua .....	477
11.4.3 Influencia de la frecuencia de carga .....	479
11.5 Ecuaciones de deformación permanente en materiales fino-granulares.....	480
11.6 Síntesis .....	484
<b>12. Materiales ligados con cementantes hidráulicos .....</b>	<b>485</b>
12.1 Losa de concreto hidráulico para pavimento rígido.....	485
12.1.1 Generalidades.....	485
12.1.2 Elementos que conforman la losa .....	492
12.1.3 Mecanismos de daño en el diseño de pavimentos rígidos.....	500
12.1.4 Aspectos constructivos y especificaciones de materiales .....	502
12.2 Base de concreto hidráulico .....	510
12.3 Bases estabilizadas con cemento hidráulico .....	512
12.4 Suelo-cemento .....	514
12.5 Adoquines de concreto.....	517
<b>13. Diseño de pavimentos .....</b>	<b>521</b>
13.1 Variables de diseño.....	521
13.1.1 Subrasante.....	521
13.1.2 Tránsito.....	522
13.2 Método AASHTO (1993) - Pavimentos flexibles y semirrígidos .....	541
13.3 Método AASHTO (1993) – Pavimento rígido .....	549
13.4 Diseño racional para pavimento flexible, rígido y semirrígido .....	553

## Índice de figuras

Figura A. Perfil típico de una estructura de pavimento flexible.....	XXX
Figura B. Perfil típico de una estructura de pavimento con capa asfáltica gruesa.....	XXI
Figura C. Perfil típico de una estructura de pavimento con capas tratadas con ligante hidráulico.....	XXI
Figura D. Perfil típico de una estructura de pavimento con estructura mixta.....	XXII
Figura E. Perfil típico de una estructura de pavimento inversa.....	XXIII
Figura F. Perfil típico de una estructura de pavimento semirrígida.....	XXIV
Figura 1.1. Penetrómetro.....	2
Figura 1.2. Comparación del CA clasificado por penetración y viscosidad.....	3
Figura 1.3. Determinación gráfica del IPen.....	7
Figura 1.4. Evolución de la viscosidad con la temperatura.....	8
Figura 1.5. Viscosímetro rotacional.....	10
Figura 1.6. Aparato de anillo y bola.....	13
Figura 1.7. Ductilímetro.....	14
Figura 1.8. Copa abierta de Cleveland.....	15
Figura 1.9. Horno RTFOT.....	16
Figura 1.10. PAV.....	16
Figura 1.11. Nomograma de Van der Poel.....	18
Figura 1.12. Estructura físico-química del asfalto, esquema coloidal de Pfeifer.....	18
Figura 1.13. Carrotanque irrigador de asfalto.....	28
Figura 1.14. Cámara de expansión.....	32
Figura 1.15. Gilsonita antes y después de trituración.....	35
Figura 2.1. Agregados pétreos.....	39
Figura 2.2. Máquina de Los Ángeles.....	40
Figura 2.3. Micro Deval.....	40
Figura 2.4. Calibrador de partículas alargadas y aplanadas.....	42
Figura 2.5. Cazuela de Casagrande y método de los rollitos.....	44
Figura 2.6. Péndulo TRRL.....	47
Figura 2.7. Viga Benkelman.....	48
Figura 2.8. Aparato Marshall.....	60
Figura 2.9. Pavimentadora o finisher.....	66
Figura 2.10. Compactadora vibratoria de rodillo o tambor.....	67
Figura 2.11. Compactadora de neumáticos.....	67
Figura 2.12. Tecnologías y ventajas medioambientales para la producción de mezclas asfálticas.....	83
Figura 2.13. Mezcladoras mecánicas.....	98
Figura 2.14. Agitador mecánico.....	98
Figura 2.15. Equipo para espumar asfalto en el laboratorio.....	99
Figura 2.16. Equipo AMPT.....	103



Figura 2.17. Proceso de fabricación del asfalto-caucho (vía húmeda) .....	104
Figura 2.18. Máquina fresadora.....	106
Figura 2.19. Densidad con densímetro nuclear y cono de arena .....	112
Figura 3.1 Vista de una capa asfáltica ahuellada.....	124
Figura 3.2. Estados de deformación.....	126
Figura 3.3. Esquema de un ensayo uniaxial de <i>creep</i> .....	127
Figura 3.4. Esquema del esfuerzo Haversine.....	128
Figura 3.5. Esquematación del ensayo triaxial cíclico al a) inicio de la prueba y b) finalizar la prueba.....	128
Figura 3.6. Equipo AMPT.....	129
Figura 3.7. Esquema de un ensayo de tracción indirecta.....	130
Figura 3.8. Diagrama del mecanismo del NAT y principio de tracción indirecta.....	130
Figura 3.9. <i>Nottingham Asphalt Tester</i> .....	131
Figura 3.10. Ensayo de pista a pequeña escala.....	131
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.....	133
Figura 3.12. Esquema del FPRT.....	134
Figura 3.13. Esquema del TxMLS .....	136
Figura 3.14. <i>National Airport Pavement Test Facility</i> (NAPTF) .....	137
Figura 3.15. Carrusel de fatiga.....	137
Figura 3.16. Carrusel de fatiga de la Universidad de Los Andes.....	138
Figura 3.17. Influencia de la magnitud del esfuerzo vertical.....	139
Figura 3.18. Influencia de la magnitud del esfuerzo vertical $\sigma_1$ . Presión de confinamiento $\sigma_3=0.2$ MN/m <sup>2</sup> , Temperatura T=45°C y frecuencia de carga f=30 Hz.....	140
Figura 3.19. Influencia de la presión de confinamiento $\sigma_3$ . Esfuerzo vertical $\sigma_1=0.01$ MN/m <sup>2</sup> , Temperatura T=30°C y frecuencia de carga f=30 Hz.....	140
Figura 3.20. Influencia del confinamiento y la frecuencia de carga.....	141
Figura 3.21. Evolución de la rigidez de una mezcla asfáltica con la presión de confinamiento para una temperatura de 10 °C y de 54 °C .....	141
Figura 3.22. Efecto del tipo de llanta sobre la acumulación de la deformación permanente.....	142
Figura 3.23. Influencia de la magnitud del esfuerzo vertical.....	142
Figura 3.24. Influencia de la temperatura.....	144
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).....	144
Figura 3.26. Efecto del grado de compactación y de la temperatura sobre ..... la rigidez de una mezcla asfáltica.....	145
Figura 3.27. Influencia de la velocidad de deformación sobre la resistencia a compresión de una mezcla asfáltica.....	146
Figura 3.28. Influencia de la velocidad de carga.....	146
Figura 3.29. Influencia del grado de compactación.....	147

Figura 3.30. Acumulación de la deformación permanente para mezclas fabricadas por el método de compactación Marshall y SUPERPAVE.....	148
Figura 3.31. Variación del módulo resiliente con la temperatura para mezclas fabricadas por el método de compactación Marshall y SUPERPAVE. ....	149
Figura 3.32. Influencia del contenido de <i>filler</i> . ....	150
Figura 3.33. Efecto de la forma de partículas y del contenido de vacíos sobre la rigidez de mezclas asfálticas. ....	151
Figura 3.34. Efecto del contenido de asfalto y de vacíos en la mezcla sobre el fenómeno de ahuellamiento en mezclas asfálticas. ....	152
Figura 3.35. Evolución de la deformación permanente con los vacíos con aire y con la temperatura.....	153
Figura 3.36. Influencia del grado PG del CA .....	155
Figura 3.37. Influencia del caucho molido de llanta. ....	156
Figura 3.38. Influencia del tamaño de grano de caucho molido de llanta. ....	156
Figura 3.39. Influencia del caucho y del SBS.....	157
Figura 3.40. Evolución de la deformación permanente vertical vs. asfáltita para mezclas modificadas empleando CA 80-100. ....	158
Figura 3.41. Evolución de la deformación con el número de pulsos de carga para una mezcla modificada con un desecho de PVC.....	158
Figura 3.42. Agrietamiento tipo piel de cocodrilo.....	167
Figura 3.43. Aparato de flexión en cuatro puntos. ....	169
Figura 3.44. Esquema del ensayo de flexión en cuatro puntos. ....	169
Figura 3.45. Equipo de ensayo de probeta trapezoidal. ....	170
Figura 3.46. Equipo NAT de la Pontificia Universidad Javeriana.....	171
Figura 3.47. Configuración de carga y falla en el ensayo diametral.....	171
Figura 3.48. Estado de esfuerzo biaxial en el ensayo diametral.....	172
Figura 3.49. Formas de falla de las muestras ITFT a) falla ideal, b) fisura sencilla, c) doble fisura, d) doble división, e) fisura múltiple, f) falla con aplastamiento localizado, g) Falla combinada: aplastamiento y fisura múltiple, h) falla combinada: aplastamiento y fisura múltiple, i) falla y deformación total.....	173
Figura 3.50. Equipo DMA. ....	174
Figura 3.51. Imagen izquierda: muestra SGC después de que las muestras DMA han sido extraídas .....	175
Figura 3.52. Representación esquemática de la máquina de ensayo de pista en laboratorio. ....	176
Figura 3.53. Ensayo de pista a baja escala. ....	176
Figura 3.54. Simulación de un eje tridem con llantas sencillas en el carrusel de fatiga.....	177
Figura 3.55. Simulación de ejes sencillos con llantas dobles en el carrusel de fatiga.....	178
Figura 3.56. Esquema de la compactación giratoria.....	181
Figura 3.57. Representación esquemática del comportamiento a la fatiga de los materiales de pavimento asfáltico bajo varios modos de carga. ....	183
Figura 3.58. Ensayo sin período de recuperación.....	186



Figura 3.59. Efecto de un intervalo de receso sobre el módulo de rigidez.....	187
Figura 3.60. Módulo dinámico de elasticidad de la mezcla AMM debido al daño por fatiga y a los períodos de receso a) recuperación a 20 °C; b) recuperación a 60 °C.....	190
Figura 3.61. Evolución del módulo resiliente ( $E_o$ ) de una mezclas asfáltica tipo MDC-2 con la temperatura y la frecuencia de carga ( $F$ ).....	191
Figura 3.62. Esfuerzo de flexión vs. número de ciclos a la falla, para mezclas de diferente rigidez ( $S$ ) .....	192
Figura 3.63. Predicción de la vida a la fatiga a partir de la rigidez inicial de la mezcla .....	193
Figura 3.64. Efecto del contenido de vacíos sobre la vida a la fatiga: mezcla británica estándar gradación 594, 7.9% de asfalto. ....	194
Figura 3.65. Efecto del contenido de vacíos sobre la vida a la fatiga: mezcla de gradación fina, 6% de asfalto. ....	195
Figura 3.66. Efecto del contenido de vacíos sobre la vida a la fatiga: mezcla de gradación gruesa, 6% de asfalto. ....	195
Figura 3.67. Efecto del contenido de vacíos sobre la vida a la fatiga de la mezcla.....	196
Figura 3.68. Efecto del contenido de vacíos de aire y del contenido de asfalto sobre la vida a la fatiga (150 microdeformaciones) .....	198
Figura 3.69. Respuesta a la fatiga de todas las mezclas ensayadas envejecidas durante siete meses a 140 °F .....	200
Figura 3.70. Evolución de la tasa promedio de agrietamiento y del número de ciclos finales de carga con la penetración del asfalto.....	201
Figura 3.71. Evolución de la tasa promedio de agrietamiento con el tamaño máximo de partícula .....	202
Figura 3.72. Evolución de la tasa promedio de agrietamiento con el módulo de corte resiliente $G^*$ y el ángulo de fase $\alpha$ .....	202
Figura 3.73. Contenido de asfalto vs. número de aplicaciones a la falla para dos tipos de agregado.....	203
Figura 3.74. Efecto de la gradación de los agregados sobre la relación entre la deformación inicial en flexión y las aplicaciones a la falla.....	204
Figura 3.75. Ilustración de la superficie de corte y de los tomogramas.....	206
Figura 3.76. Evaluación de tomogramas mostrando las partículas y los vacíos.....	206
Figura 3.77. Resultados de los ensayos de fatiga sobre muestras de <i>sandsheet</i> a varias temperaturas y velocidades, bajo esfuerzo controlado .....	207
Figura 3.78. Temperatura del ensayo vs. número de aplicaciones a la falla .....	208
Figura 3.79. Resultados de fatiga para muestras de mezcla asfáltica a varias temperaturas bajo deformación torsional controlada .....	208
Figura 3.80. Ley de fatiga para mezclas asfálticas modificadas con grano-caucho.....	209
Figura 3.81. Relación de esfuerzo térmico vs. rigidez de la mezcla.....	210
Figura 3.82. Resultado típico de un ensayo TSRST .....	211

Figura 3.83. Temperatura de fractura vs. tiempo de envejecimiento a temperaturas de a) 50 °C y b) 85 °C.....	212
Figura 3.84. Curva de Wholer (ley de fatiga) para ensayos bajo a) deformación controlada y b) esfuerzo controlado .....	214
Figura 3.85. Deformación inicial vs. aplicaciones de carga. Comparación ..... para ensayos bajo esfuerzo controlado y a deformación controlada .....	215
Figura 4.1. Compactador Giratorio Superpave. ....	227
Figura 4.2. Muestra obtenida del Compactador Giratorio Superpave vs. Marshall.....	228
Figura 4.3. Granulometría recomendada para agregado pétreo con NMAS=12.5 mm. ....	231
Figura 4.4. Ejemplo de límites para la granulometría SUPERPAVE.....	232
Figura 4.5. Reómetro dinámico de corte DSR de la Pontificia Universidad Javeriana. ....	235
Figura 4.6. Muestra para el ensayo DSR .....	235
Figura 4.7. Ángulo de fase.....	236
Figura 4.8. Reómetro de viga en flexión – BBR.....	237
Figura 4.9. Muestra para el ensayo BBR. ....	237
Figura 4.10. Equipo DDT .....	238
Figura 4.11. Propiedades de desempeño de los equipos de prueba .....	239
Figura 4.12. Viga en flexión.....	242
Figura 6.1. Fisura longitudinal. ....	267
Figura 6.2. Fisura transversal.....	268
Figura 6.3. Agrietamiento tipo malla eslabonada.....	269
Figura 6.4. Piel de cocodrilo. ....	269
Figura 6.5. Fisura en bloque. ....	270
Figura 6.6. Fisura longitudinal en junta de construcción.....	271
Figura 6.7. Fisura transversal en junta de construcción .....	271
Figura 6.8. Fisura por reflexión de juntas en placas de concreto .....	272
Figura 6.9. Fisura en media luna .....	272
Figura 6.10. Fisura de borde. ....	273
Figura 6.11. Fisura por deslizamiento .....	274
Figura 6.12. Ahuellamiento. ....	275
Figura 6.13. Hundimiento. ....	276
Figura 6.14. Ondulación .....	277
Figura 6.15. Descascaramiento. ....	278
Figura 6.16. Bache. ....	279
Figura 6.17. Parches.....	279
Figura 6.18. Desgaste superficial. ....	281
Figura 6.19. Pérdida de agregado pétreo .....	281
Figura 6.20. Surcos .....	282
Figura 6.21. Pulimento del agregado pétreo. ....	283
Figura 6.22. Cabezas duras.....	283
Figura 6.23. Exudación.....	284
Figura 6.24. Afloramiento de agua .....	285
Figura 6.25. Afloramiento de finos .....	285



Figura 6.26. Corrimiento vertical de la berma .....	286
Figura 6.27. Curva de calibración PAVER para el deterioro por corrugación.....	287
Figura 6.28. Curva de calibración PAVER para fisuras longitudinales y transversales.....	288
Figura 6.29. Curva de calibración PAVER para baches.....	288
Figura 6.30. Curva de calibración PAVER para piel de cocodrilo.....	289
Figura 6.31. Curva de calibración PAVER para hundimientos.....	289
Figura 6.32. Curva de calibración PAVER para exudación.....	290
Figura 6.33. Curva de calibración PAVER para desgaste superficial.....	290
Figura 6.34. Curva de calibración PAVER para ahuellamiento.....	291
Figura 6.35. Equipos de topografía (mira y nivel).....	293
Figura 6.36. Representación gráfica del modelo cuarto de carro.....	294
Figura 6.37. Perfilógrafo láser.....	296
Figura 6.38. MERLIN.....	296
Figura 6.39. Perfilógrafo de California.....	296
Figura 6.40. Analizador de rugosidad superficial (ARS).....	297
Figura 6.41. Círculo de arena.....	299
Figura 6.42. FWD.....	303
Figura 6.43. Viga Benkelman.....	303
Figura 6.44. Curviómetro.....	304
Figura 6.45. Deflectógrafo tipo Lacroix.....	304
Figura 6.46. Imagen un apique sobre un suelo.....	306
Figura 6.47. Núcleo de capa asfáltica.....	307
Figura 6.48. Medición utilizando el método SPB.....	311
Figura 6.49. Comparación medición de ruido utilizando mecanismos tipo CPB y CPX .....	311
Figura 7.1. Distribución de aprovechamiento de las llantas usadas en la cadena de gestión (porcentaje en toneladas).....	314
Figura 7.2. Ley de fatiga para mezclas asfálticas modificadas con grano-caucho .....	321
Figura 7.3. Influencia del caucho molido de llanta.....	322
Figura 7.4. Influencia del tamaño de grano de caucho molido de llanta.....	322
Figura 7.5. Influencia del caucho y del SBS.....	323
Figura 7.6. Costo de mantenimiento de vías pavimentadas con mezclas convencionales y modificadas con asfalto-GCR en Arizona (USA).....	328
Figura 8.1. Material tipo rajón.....	346
Figura 8.2. Equipo para ejecución del ensayo <i>CBR</i> en laboratorio.....	349
Figura 8.3. Equipo para ejecución del ensayo <i>CBR in situ</i> .....	350
Figura 8.4. Equipo de penetración con cono dinámico.....	353
Figura 8.5. Ejemplo típico de un resultado de un ensayo <i>PDC</i> .....	353
Figura 8.6. Equipo para el ensayo de placa.....	354
Figura 8.7. Equipo triaxial cíclico.....	355
Figura 8.8. Relación entre el <i>CBR</i> y el módulo resiliente ( $M_r$ ).....	358
Figura 8.9. Correlación entre $M_r$ y <i>CBR</i> .....	359

Figura 8.10. Equipo FWD.....	360
Figura 9.1. Desarrollo de deformación permanente en experimentos del <i>Transport Research Laboratory</i> (TRL) en Alconbury Hill.....	368
Figura 9.2. Estructuras de pavimento ensayadas en un HVS.....	369
Figura 9.3. Resultados de desplazamiento de estructuras ensayadas en un HVS.....	369
Figura 9.4. Sistema multicapa elástico para el análisis de pavimentos.....	375
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.....	376
Figura 9.6. Variación de esfuerzos con respecto al tiempo cuando se aplica una carga vehicular.....	378
Figura 10.1. Esquema de un equipo triaxial.....	386
Figura 10.2. Estado de esfuerzos durante la ejecución del ensayo de módulo resiliente.....	386
Figura 10.3. Curva típica de un ensayo triaxial cíclico sobre un material granular.....	387
Figura 10.4. Trayectorias de esfuerzos para el cálculo del módulo resiliente.....	387
Figura 10.5. Mediciones <i>in situ</i> del esfuerzo vertical en subrasantes.....	389
Figura 10.6. Tiempo de pulsación del esfuerzo vertical con carga senoidal y triangular.....	390
Figura 10.7. Variación del módulo resiliente con $\theta$ .....	392
Figura 10.8. Variación del $M_r$ con $\theta$ calculado en un simulador de vehículo pesado (HVS por su sigla en inglés).....	392
Figura 10.9. Variación del módulo resiliente con $\theta$ y con el esfuerzo desviador ( $q$ ).....	393
Figura 10.10. Variación del módulo resiliente con $\theta$ y con el esfuerzo desviador ( $q$ ).....	393
Figura 10.11. Variación del módulo resiliente con el esfuerzo octaédrico de corte.....	394
Figura 10.12. Variación del módulo resiliente con el esfuerzo desviador.....	394
Figura 10.13. Variación del módulo resiliente con el esfuerzo desviador; $p$ es la presión media inicial del ensayo o presión de cámara.....	395
Figura 10.14. Variación del módulo resiliente con la suma de esfuerzos principales.....	396
Figura 10.15. Módulo resiliente de una grava densa.....	396
Figura 10.16. Efecto del grado de saturación sobre el $M_r$ para $\theta=10$ psi y $N=159$ .....	398
Figura 10.17. Efecto del contenido de agua sobre el módulo resiliente.....	398
Figura 10.18. Efecto del contenido de agua sobre el $M_r$ .....	399
Figura 10.19. Efecto del grado de saturación sobre el módulo resiliente.....	399
Figura 10.20. Efecto de la densidad sobre el módulo resiliente.....	401
Figura 10.21. Efecto de la densidad sobre el módulo.....	401
Figura 10.22. Efecto del contenido de finos sobre el módulo.....	402
Figura 10.23. Efecto del tipo de material sobre el módulo.....	403



Figura 10.24. Efecto del tamaño de la muestra sobre el módulo resiliente.....	404
Figura 10.25. Influencia del tamaño máximo de partícula sobre el $M_r$ para a) grava – arena, b) piedra caliza y c) concreto reciclado .....	405
Figura 10.26. Valores de $M_r$ para tres granulometrías distintas .....	406
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 .....	407
Figura 10.28. Efecto de la frecuencia de carga sobre el módulo resiliente.....	408
Figura 10.29. Variación del módulo resiliente con el tipo de ensayo.....	409
Figura 10.30. Trayectorias de esfuerzo utilizadas por a) Allen y Thompson (1974) y b) Brown y Hyde (1975).....	410
Figura 10.31. Variación del módulo resiliente con $\theta$ .....	410
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 .....	411
Figura 10.33. Distribución de esfuerzo vertical en un pavimento.....	413
Figura 10.34. Distribución de esfuerzo horizontal en un pavimento .....	413
Figura 10.35. Estructura de pavimento simulada .....	422
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 .....	422
Figura 10.37. Evolución del $M_r$ con el esfuerzo desviador .....	424
Figura 10.38. Influencia de la presión de confinamiento ( $\sigma_3$ ) sobre el $M_r$ .....	424
Figura 10.39. Influencia de la presión de confinamiento ( $\sigma_3$ ) sobre el $M_r$ .....	425
Figura 10.40. Evolución del $M_r$ con el esfuerzo desviador .....	425
Figura 10.41. Evolución del $M_r$ con el grado de saturación .....	426
Figura 10.42. Evolución del $M_r$ para una muestra de arcilla con contenido de agua a) inferior al OMC y b) superior al OMC.....	427
Figura 10.43. Evolución del $M_r$ para una muestra de arcilla con el contenido de agua .....	428
Figura 10.44. Evolución del $M_r$ con la succión .....	429
Figura 10.45. Evolución del $M_r$ con el esfuerzo desviador y con la succión .....	430
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 .....	430
Figura 10.47. Evolución del $M_r$ con el porcentaje de compactación Proctor .....	431
Figura 10.48. Representación esquemática de evolución del $M_r$ con la densidad y con el contenido de agua .....	431
Figura 10.49. Representación esquemática del modelo bilineal. ....	432
Figura 10.50. Representación esquemática del modelo hiperbólico. ....	434
Figura 10.51. Evolución del $M_r$ con la resistencia a la deformación inconfiada al 1% de deformación.....	436
Figura 11.1. Curva típica esfuerzo-deformación en un ciclo de carga y descarga. ....	443

Figura 11.2. Influencia del nivel de esfuerzo sobre la acumulación de la deformación permanente .....	445
Figura 11.3. Influencia del esfuerzo axial sobre la acumulación de la deformación permanente.....	445
Figura 11.4. Influencia del esfuerzo desviador sobre la deformación permanente. $\sigma_3=100$ kPa.....	446
Figura 11.5. Influencia de la presión media inicial (p) sobre la deformación permanente. $q=150$ kPa .....	446
Figura 11.6. Influencia del nivel de esfuerzo sobre la acumulación de la deformación permanente.....	447
Figura 11.7. Deformación permanente vs. $q/p$ , $N=20000$ a) Sorèze, b) Poulmarch.....	448
Figura 11.8a. Deformación permanente axial vs. $N$ . $q=35$ kPa, $p=70$ kPa.....	449
Figura 11.8b. Deformación permanente axial vs. $N$ . $q=280$ kPa, $p=140$ kPa .....	450
Figura 11.8c. Deformación permanente axial vs. $N$ . $q=840$ kPa, $p=140$ kPa .....	450
Figura 11.9. Influencia de la historia de esfuerzos .....	451
Figura 11.10. Influencia de la condición de drenaje sobre la acumulación de la deformación permanente, $\sigma_3=70$ kPa .....	454
Figura 11.11. Influencia de las condiciones de drenaje sobre la deformación permanente .....	454
Figura 11.12. Influencia de las condiciones de drenaje sobre la deformación permanente .....	455
Figura 11.13. Efecto de la elevación del nivel freático sobre la deformación permanente .....	455
Figura 11.14. Influencia del grado de saturación sobre la relación de esfuerzo (esfuerzo desviador/resistencia monotónica de corte), en la cual las deformaciones permanentes tienden a estabilizarse .....	456
Figura 11.15. Efecto de la densidad sobre la acumulación de la deformación permanente.....	457
Figura 11.16. Deformación permanente vs. número de ciclos de carga.....	458
Figura 11.17. Influencia de la frecuencia de carga sobre la relación de vacíos de un material granular.....	459
Figura 11.18. Influencia de la frecuencia de carga sobre la amplitud de la deformación .....	460
Figura 11.19. Influencia del contenido de finos sobre la acumulación de la deformación permanente.....	462
Figura 11.20. Influencia del tipo de material granular sobre la deformación permanente .....	462
Figura 11.21. Influencia del tipo de material sobre la acumulación de la deformación permanente.....	464
Figura 11.22. Carrusel de fatiga de la Universidad de Los Andes. ....	465
Figura 11.23. Deformación permanente versus $q_{max} \sigma_{3med}$ .....	467



Figura 11.24. Evolución de la deformación permanente vertical y volumétrica con el número de ciclos de carga en ensayos PCC y PCV.....	468
Figura 11.25. Evolución de la deformación vertical permanente con el esfuerzo sobre una arcilla A-6.....	476
Figura 11.26. Relación entre la deformación permanente y el módulo resiliente .....	477
Figura 11.27. Evolución de la deformación permanente con la humedad y el esfuerzo desviador .....	478
Figura 11.28. Evolución de la deformación permanente con la frecuencia de carga para una muestra de arcilla saturada al a) 95% y b) 63%.....	479
Figura 11.29. Evolución de la deformación permanente con la frecuencia de carga.....	480
Figura 12.1. Compactación con regla. ....	489
Figura 12.2. Compactación con rodillo liso. ....	490
Figura 12.3. Pavimentadora de concreto. ....	490
Figura 12.4. Llana flotadora de pavimentadora de concreto.....	490
Figura 12.5. Llana manual para el sello de poros superficiales. ....	491
Figura 12.6. Proceso de microtexturizado longitudinal. ....	491
Figura 12.7. Textura transversal empleando un cepillo texturizador. ....	491
Figura 12.8. Perfil típico de una estructura de pavimento rígido con junta con pasadores. ....	492
Figura 12.9. Vista de planta típica de una losa de pavimento rígido con junta con pasadores y barras de anclaje.....	493
Figura 12.10. Perfil típico de juntas: a) cuando el concreto se ha construido a ambos lados de la junta; b) junta de expansión o de aislamiento. ....	494
Figura 12.11. Ejemplo de una vista en planta de juntas de expansión: a) triangular rodeando un sumidero; b) circular rodeando un poso de inspección. ....	494
Figura 12.12. Corte de losas para construcción de juntas. ....	497
Figura 12.13. Canasta con pasadores en una junta transversal. ....	498
Figura 12.14. Proceso de sellado de una junta. ....	500
Figura 12.15. Agrietamiento en losas. ....	502
Figura 12.16. Perfil típico de estructura de pavimento articulado.....	518
Figura 12.17. Vista en planta típica de estructura de pavimento articulado. ....	518
Figura 13.1. Placa en flexión .....	538
Figura 13.2. Esquema de celdas de carga. ....	539
Figura 13.3. Sensor piezoeléctrico.....	539
Figura 13.4. Sensor de capacitancia. ....	540
Figura 13.5. Fibra óptica .....	540
Figura 13.6. Coeficiente estructural $a_1$ para mezcla de concreto asfáltico. ....	542
Figura 13.7. Coeficiente estructural $a_2$ para base granular no tratada. ....	542
Figura 13.8. Coeficiente estructural $a_3$ para subbase granular no tratada.....	543
Figura 13.9. Esquematización del programa CEDEM.....	554
Figura 13.10. Datos de entrada al programa CEDEM. ....	555

Figura 13.11. Datos de entrada al programa CEDEM para pavimento flexible con capas granulares .....	561
Figura 13.12. Presentación de los resultados de la simulación para pavimento flexible con capas granulares. ....	562
Figura 13.13. Datos de entrada al programa CEDEM para simulación para pavimento flexible con capas granulares. ....	563
Figura 13.14. Presentación de los resultados de la simulación para pavimento flexible con capas granulares. ....	564
Figura 13.15. Datos de entrada al programa CEDEM para capas asfálticas gruesas. ....	565
Figura 13.16. Presentación de los resultados de la simulación para capas asfálticas gruesas. ....	566
Figura 13.17. Datos de entrada al programa CEDEM para simulación de pavimento en concreto con pasadores. ....	568
Figura 13.18. Presentación de los resultados de la simulación de pavimento en concreto con pasadores. ....	569
Figura 13.19. Datos de entrada al programa CEDEM para simulación de pavimento en concreto con pasadores. ....	570
Figura 13.20. Presentación de los resultados de la simulación de pavimento en concreto con pasadores. ....	571
Figura 13.21. Datos de entrada al programa CEDEM para simulación del pavimento semirrígido. ....	572
Figura 13.22. Presentación de los resultados de la simulación del pavimento semirrígido. ....	573

## 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 .....	5
Tabla 1.4. Requisitos mínimos de calidad del CA modificado. ....	21
Tabla 1.5. Requisitos mínimos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas. ....	24
Tabla 1.6. Requisitos mínimos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas modificadas. ....	29
Tabla 1.7. Requisitos mínimos de calidad exigidos a asfaltos líquidos para utilizar como imprimantes. ....	31
Tabla 2.1. Categorías de tránsito de acuerdo con Invías (2013) y con IDU (2011). ....	38
Tabla 2.2. Granulometría del agregado pétreo para MAF .....	44
Tabla 2.3. Caracterización de los agregados para mezclas MAF. ....	45
Tabla 2.4. Valores especificados de resistencia al deslizamiento para MAF. ....	47
Tabla 2.5. Valores máximos admisibles de IRI (m/km). ....	48
Tabla 2.6. Granulometría del agregado pétreo para MAC. ....	49



Tabla 2.7. Caracterización de los agregados para mezclas MAC. ....	49
Tabla 2.8. Tolerancias granulométricas para agregados de MAC.....	50
Tabla 2.9. Granulometría del agregado pétreo para MDF. ....	51
Tabla 2.10. Caracterización de los agregados para mezclas MDF.....	52
Tabla 2.11. Recomendación de utilización de MDF según espesor y tipo de capa.....	54
Tabla 2.12. Valores especificados de resistencia al deslizamiento con el péndulo para MDF. ....	55
Tabla 2.13. Valores máximos admisibles de IRI (m/km).....	56
Tabla 2.14. Granulometría de mezclas de concreto asfáltico. ....	57
Tabla 2.15. Caracterización de los agregados para mezclas MDC, MSC, MGC. ....	58
Tabla 2.16. Caracterización de los agregados para mezclas MAM .....	59
Tabla 2.17. Criterios para diseño de concreto asfáltico (ensayo Marshall).....	60
Tabla 2.18. Criterios para diseño de concreto asfáltico (ensayo Marshall) .....	61
Tabla 2.19. Recomendación de utilización de concreto asfáltico según espesor y tipo de capa.....	64
Tabla 2.20. Valores especificados de resistencia al deslizamiento con el péndulo para concreto asfáltico.....	68
Tabla 2.21. Valores máximos admisibles de IRI (m/km).....	69
Tabla 2.22. Granulometría de mezcla SAA-10 y SAA-3.....	70
Tabla 2.23. Caracterización de los agregados para mezclas SAA. ....	70
Tabla 2.24. Valores de resistencia al deslizamiento con el péndulo para SAA. ....	71
Tabla 2.25. Granulometría de mezclas TSS. ....	72
Tabla 2.26. Granulometría de mezclas TSD. ....	72
Tabla 2.27. Caracterización de los agregados para mezclas TSS y TSD. ....	72
Tabla 2.28. Valores especificados de resistencia al deslizamiento con el péndulo para TSS y TSD.....	73
Tabla 2.29. Granulometría de mezclas LA. ....	74
Tabla 2.30. Caracterización de los agregados para mezclas LA.....	75
Tabla 2.31. Valores especificados de resistencia al deslizamiento con el péndulo para LA. ....	76
Tabla 2.32. Profundidad de textura mediante círculo de arena. ....	76
Tabla 2.33. Granulometría de mezclas MD. ....	77
Tabla 2.34. Caracterización de los agregados para mezclas MD.....	78
Tabla 2.35. Valores máximos admisibles de IRI (m/km).....	79
Tabla 2.36. Granulometría de mezclas M, F. ....	80
Tabla 2.37. Caracterización de los agregados para mezclas M y F. ....	80
Tabla 2.38. Coeficiente de resistencia al deslizamiento y textura superficial.....	82
Tabla 2.39. Valores máximos admisibles de IRI (m/km).....	82
Tabla 2.40. Requerimiento de especímenes para WMA. ....	99
Tabla 2.41. Valores mínimos de número de flujo para WMA.....	103
Tabla 2.42. Granulometría de agregados reciclados. ....	107
Tabla 2.43. Caracterización de los agregados de adición para mezclas RAP en frío. ....	107

Tabla 2.44. Caracterización de los agregados que se van a adicionar para mezclas RAP en caliente.....	109
Tabla 2.45. Granulometría de agregados para BEE. ....	110
Tabla 2.46. Caracterización de los agregados para BEE-25 y BEE-38.....	111
Tabla 2.47. Granulometría de agregados para MGEA. ....	114
Tabla 2.48. Caracterización de los agregados para MGEA. ....	114
Tabla 2.49. Granulometría de bases granulares no tratadas. ....	115
Tabla 2.50. Requisitos mínimos de calidad de agregado pétreo para base granular. ....	116
Tabla 2.51. Parámetros recomendados por el Instituto Nacional de Vías - Invías (2007) para capas de rodadura conformadas por una mezcla asfáltica tipo MDC-2.....	120
Tabla 2.52. Parámetros recomendados por IDU (2002) para capas de rodadura conformadas por una mezcla asfáltica tipo CASA y para capas de base asfáltica conformadas por una mezcla asfáltica tipo 1.....	120
Tabla 2.53. Valores máximos recomendados de módulo resiliente (E) para capas de rodadura, base asfáltica y mezclas de alto módulo.....	121
Tabla 3.1. Factores que afectan el fenómeno de ahuellamiento en mezclas asfálticas.....	126
Tabla 3.2. Criterio de rigidez de mezclas en ensayos de creep para evitar el fenómeno de ahuellamiento en mezclas asfálticas. ....	126
Tabla 3.3. Límites admisibles de deformación. ....	127
Tabla 3.4. Coeficientes de la ecuación (3.1) propuestos por diversos investigadores. ....	159
Tabla 3.5. Comparación de los ensayos bajo esfuerzo controlado y los de deformación controlada.....	186
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.....	200
Tabla 3.7. Coeficientes de regresión de la ecuación (3.28). ....	213
Tabla 4.1. Número de giros en el SGC. ....	229
Tabla 4.2. Requerimientos volumétricos de SUPERPAVE. ....	229
Tabla 4.3. Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 19 mm. ....	232
Tabla 4.4. Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm. ....	232
Tabla 4.5. Condiciones para pruebas SUPERPAVE.....	239
Tabla 5.1 Métodos utilizados para evaluar envejecimiento de mezclas .....	248
Tabla 6.1. Caracterización del MDR.....	291
Tabla 6.2. Clasificación del PCI.....	292
Tabla 6.3. Valores máximos admisibles de IRI (m/km) para MAF.....	294
Tabla 6.4. Valores máximos admisibles de IRI (m/km) para MDF.....	294
Tabla 6.5. Valores máximos admisibles de IRI (m/km) para concreto asfáltico.....	294
Tabla 6.6. Valores máximos admisibles de IRI (m/km) para MD. ....	295



Tabla 6.7. Valores máximos admisibles de IRI (m/km) para mezclas discontinuas en caliente. ....	295
Tabla 6.8. Caracterización del IRI. ....	295
Tabla 6.9. Caracterización del PSI. ....	298
Tabla 6.10. Clasificación funcional de la vía a través del OPI. ....	298
Tabla 6.11. Valores especificados de resistencia al deslizamiento con el péndulo para concreto asfáltico. ....	300
Tabla 6.12. Clasificación de la capacidad estructural del pavimento. ....	307
Tabla 6.13. Criterio de la <i>Bureau Reclamation</i> (USA) para tipificar el potencial de expansión de un suelo. ....	308
Tabla 6.14. Criterio de la Norma Sismoresistente Colombiana NSR-10 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS (2010). ....	309
Tabla 6.15. Potencial de expansión de un suelo en función del IP, LC y LL ....	309
Tabla 6.16. Potencial de expansión de un suelo en función del IP y LL ....	309
Tabla 7.1. Características del GCR. ....	318
Tabla 7.2. Granulometría del GCR. ....	318
Tabla 7.3. Especificación de asfalto modificado con GCR. ....	318
Tabla 7.4. Valores recomendados para modificar el CA con el GCR. ....	319
Tabla 7.5. Especificación de asfalto modificado con GCR. ....	319
Tabla 7.6. Propiedades mínimas de mezclas modificadas con asfalto-GCR ....	319
Tabla 7.7. Análisis del costo del ciclo de vida de mezclas asfálticas con GCR y sin modificación ....	328
Tabla 7.8. Estado de la red vial nacional. ....	330
Tabla 7.9. Peso máximo permitido, porcentaje de excedidos y peso máximo registrado de camiones tipo C2 en cinco vías colombianas ....	331
Tabla 7.10. Peso máximo permitido, porcentaje de excedidos y peso máximo registrado de camiones tipo C3 en cinco vías colombianas. ....	331
Tabla 8.1. Granulometría para bases granulares no tratadas. ....	340
Tabla 8.2. Requisitos mínimos de calidad de agregados pétreos gruesos para bases granulares acordes con Invías (2013). ....	340
Tabla 8.3. Granulometría para subbases granulares no tratadas. ....	341
Tabla 8.4. Requisitos mínimos de calidad de agregados pétreos gruesos para subbases granulares acordes con Invías (2013). ....	342
Tabla 8.5. Granulometría para afirmados. ....	344
Tabla 8.6. Requisitos mínimos de calidad de agregados pétreos gruesos para afirmados acordes con Invías (2013). ....	344
Tabla 8.7. Requisitos mínimos de calidad de agregados pétreos gruesos y finos para materiales de conformación acordes con Invías ....	346
Tabla 8.8. Granulometría material de rajón. D es el tamaño máximo de partícula. ....	347
Tabla 8.9. Valores reportados de los parámetros <i>a</i> y <i>b</i> de la ecuación (8.2) ....	349
Tabla 8.10. Valores de presión y penetración de la muestra patrón. ....	351
Tabla 8.11. Percentiles para determinar el <i>CBR</i> de la subrasante ....	352
Tabla 8.12. Clasificación del suelo de acuerdo con el <i>CBR</i> . ....	352

Tabla 8.13. Valores de módulo resiliente en función del <i>CBR</i> (valor relativo de soporte - <i>VRS</i> para México), clasificación del suelo (AASHTO y USC), módulo de reacción de la subrasante ( <i>K</i> ) y peso unitario seco ( $\gamma_d$ ) .....	358
Tabla 8.14. Valores típicos de $M_r$ para materiales granulares. ....	361
Tabla 8.15. Criterio de la <i>Bureau Reclamation</i> (USA) para tipificar el potencial de expansión de un suelo.....	363
Tabla 8.16. Criterio de la Norma Sismoresistente Colombiana NSR-10 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS (2010).....	363
Tabla 8.17. Potencial de expansión de un suelo en función del IP, el LC y el LL .....	363
Tabla 8.18. Potencial de expansión de un suelo en función del IP y del LL .....	363
Tabla 9.1. Peso máximo permitido, porcentaje de excedidos y peso máximo registrado de camiones tipo C2 en cinco vías colombianas .....	371
Tabla 9.2. Peso máximo permitido, porcentaje de excedidos y peso máximo registrado de camiones tipo C3 en cinco vías colombianas.....	372
Tabla 10.1. Esfuerzos recomendados para determinar el $M_r$ en suelos finos. ....	389
Tabla 12.1. Composición química típica del cemento hidráulico .....	486
Tabla 12.2. Dimensión recomendada de los pasadores, dovelas o barras de transferencia.....	498
Tabla 12.3. Dimensión recomendada de la barra de anclaje. ....	499
Tabla 12.4. Granulometría de agregado fino para concreto hidráulico de pavimentos rígidos.....	508
Tabla 12.5. Granulometría del agregado grueso para concreto hidráulico de pavimentos rígidos.....	508
Tabla 12.6. 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.....	510
Tabla 12.7. Granulometría de mezclas de concreto para base.....	510
Tabla 12.8. Requisitos mínimos de calidad de agregado pétreo para mezclas de concreto para base.....	511
Tabla 12.9. Granulometría recomendada para bases estabilizadas con cemento hidráulico. ....	512
Tabla 12.10. Requisitos mínimos de calidad del agregado pétreo para BTC.....	513
Tabla 12.11. Granulometría recomendada para bases estabilizadas con cemento hidráulico. ....	515
Tabla 12.12. Granulometría recomendada para la arena de sello.....	518
Tabla 12.13. Granulometría recomendada para la capa de arena.....	518
Tabla 13.1 Espesores recomendados de sustitución de subrasante para alcanzar <i>CBR</i> de plataforma mínimo de 5%. ....	522
Tabla 13.2 Distribución de vehículos, ejes y factores daño de 8.2 ton.....	525
Tabla 13.3 Distribución de vehículos, ejes y coeficiente de agresividad en ejes de 13 ton.....	529
Tabla 13.4. Serviciabilidad final, $P_f$ .....	544
Tabla 13.5. Calidad del drenaje.....	545



Tabla 13.6. Valores de  $m_i$  recomendados para corregir los coeficientes estructurales de bases y subbases granulares. .... 545

Tabla 13.7. Niveles de confiabilidad  $R$  recomendados ..... 545

Tabla 13.8. Algunos valores de fractil de la ley normal centrada,  $Z_p$ ..... 546

Tabla 13.9. Error normal combinado,  $S_o$ . .... 546

Tabla 13.10. Espesores mínimos de capas. .... 547

Tabla 13.11. Valores de  $K$  cuando la losa se apoya sobre una capa granular o una capa estabilizada con cementante hidráulico..... 550

Tabla 13.12. Serviciabilidad final,  $P_f$ ..... 550

Tabla 13.13. Valores de  $C_d$  recomendados. .... 551

Tabla 13.14. Clasificación del tipo de tránsito..... 553

Tabla 13.15. Módulo para capas granulares no tratadas ..... 556

Tabla 13.16. Valores recomendados de módulo para capas de rodadura y base asfáltica ..... 556

Tabla 13.17. Niveles de  $p_f$  recomendados..... 557

Tabla 13.18. Fractil  $u$ . .... 557



Bibliografía: Consultar en el complemento virtual SIL (Sistema de Información en Línea) [www.ecoediciones.com](http://www.ecoediciones.com)

# 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 para carreteras y 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 para el caso de carreteras y vías urbanas.

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; 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 visco-elastoplástico 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 visco-elastoplástico 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 respectivamente, 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 en el mundo 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 y 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 o ligados (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 elasto-plásticas asociadas con los fenómenos de fatiga y ahuellamiento en las mezclas asfálticas (Dawson & Plaistow, 1993; Li & Selig, 1994; Frost et al., 2004), 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 conformación, 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 y rígidas por los métodos de la American Association of State and Highway Transportation Officials - AASHTO (1993) y por el método “racional” del Instituto de Desarrollo Urbano - IDU y de la Universidad de Los Andes (2002).

## **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.

## Fredy Alberto Reyes Lizcano

Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana (1983). D.E.A. Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, Nantes – Francia (1985). PhD. En Ingeniería, Laboratoire Central des Ponts et chaussées y Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, Nantes – Francia (1988). Actualmente es profesor titular de la Pontificia Universidad Javeriana. Experiencia profesional de 30 años, 10 de los cuales los ha desempeñado en construcciones civiles y montajes electromecánicos, como ingeniero residente, director de obra, gerente de proyectos en importantes proyectos del sector petrolero y vial. Director de la Especialización en Geotecnia Vial y Pavimentos de la Pontificia Universidad Javeriana desde enero de 2002 a mayo de 2009 y director de la maestría en Ingeniería Civil de mayo de 2009 a mayo de 2014.

Experiencia como docente, director o investigador de proyectos de consultoría especializada en pavimentos de 18 años. Dicta los cursos de Fundamentos de Pavimentos, Pavimentos, Diseño Racional de Pavimentos, Construcción, Métodos y Procesos Constructivos, Materiales, Gerencia de Proyectos, Construcción de Infraestructura Vial, Proyecto grado. Ha sido autor de 6 libros y de más de 150 artículos y ponencias, nacionales e internacionales. Premio Nacional de Ingeniería *Diodoro Sánchez* año 2004, 2009 y 2012 por los libros *Diseño Racional de Pavimentos*, *Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas*, y *Pavimentos Asfálticos*, Premio Bienal al investigador javeriano 2005 y mención de honor en 2003. Mención en el Premio Internacional en innovación de Carreteras, Juan Antonio Fernández del Campo, Madrid, noviembre 2006.

# Pavimentos

Materiales, construcción y diseño



Con base en una amplia revisión bibliográfica, se describen y reportan estados del conocimiento completos sobre la forma como se han investigado en el mundo materiales para carreteras como son los asfálticos, los granulares no tratados y estabilizados con cementantes hidráulicos. Asimismo, se describen para estos materiales los conceptos y fundamentos básicos que el Ingeniero debe conocer a la hora de emplearlos como materiales de construcción de estructuras de pavimentos para carreteras y vías urbanas.

Se reportan los mecanismos de daño de pavimentos y las ecuaciones matemáticas más utilizadas en el mundo para intentar predecir el comportamiento que experimentan los materiales que componen estas estructuras viales. Además se presentan, de manera resumida y didáctica, las especificaciones técnicas de construcción y los ensayos que se deben ejecutar a la hora de evaluar los requisitos mínimos de calidad de los materiales que conforman pavimentos. En síntesis, el presente documento técnico trata los aspectos más importantes que el ingeniero debe conocer a la hora de diseñar, construir, controlar e investigar pavimentos para carreteras y vías urbanas.

**Colección:** Ingeniería y salud en el trabajo

**Área:** Ingeniería civil

ECO  
EDICIONES

[www.ecoediciones.com](http://www.ecoediciones.com)

ISBN 978-958-771-175-2



9 789587 711752

e-ISBN 978-958-771-176-9