



## Pavimentos: materiales, construcción y diseño

Autor: Hugo Alexander Rondón Quintana  
Fredy Alberto Reyes Lizcano

© Derechos de autor registrados:  
[Empresa Editora Macro EIRL](#)

© Derechos de edición, arte gráfico y diagramación reservados:  
[Empresa Editora Macro EIRL](#)

Edición original publicada por Ecoe Ediciones Ltda., Bogotá (Colombia)  
ISBN: 978-958-771-175-2  
[Derechos reservados © Ecoe Ediciones Ltda., Bogotá \(Colombia\)](#)

Edición a cargo de:  
[© Empresa Editora Macro EIRL](#)  
Av. Paseo de la República N.º 5613, Miraflores, Lima, Perú

- 📞 Teléfono: (511) 748 0560
- ✉️ E-mail: [proyectoeditorial@editorialmacro.com](mailto:proyectoeditorial@editorialmacro.com)
- 🌐 Página web: [www.editorialmacro.com](http://www.editorialmacro.com)

Primera edición: marzo de 2015  
Tiraje: 1000 ejemplares

**Impresión**  
Talleres gráficos de la Empresa Editora Macro EIRL  
Jr. San Agustín N.º 612-624, Surquillo, Lima, Perú

ISBN N.º 978-612-304-263-9  
Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N.º 2015-04557

**Prohibida la reproducción parcial o total, por cualquier medio o método, de este libro sin previa autorización de la Empresa Editora Macro EIRL.**

# Indice

Introducción .....	23
1. Materiales o ligantes asfálticos.....	33
1.1 Cemento asfáltico .....	34
1.1.1 Generalidades .....	34
1.1.2 Rígidez del cemento asfáltico .....	49
1.1.3 Estructura física-química.....	50
1.2 Cemento asfáltico modificado.....	51
1.3 Emulsiones asfálticas .....	54
1.4 Asfaltos líquidos, rebajados o <i>cut-back</i> .....	63
1.5 Asfaltos espumados.....	64
1.6 Crudo de Castilla.....	64
1.7 Asfaltos naturales.....	65
2. Mezclas asfálticas.....	69
2.1 Generalidades .....	69
2.2 Agregados pétreos.....	70
2.3 Mezcla asfáltica abierta en frío .....	76
2.4 Mezcla asfáltica abierta en caliente .....	80
2.5 Mezcla asfáltica densa en frío.....	83
2.6 Concreto asfáltico .....	88
2.7 Mezclas de arena - asfalto .....	102
2.8 Tratamientos superficiales.....	103
2.9 Lechadas asfálticas ( <i>slurry and seal</i> ) .....	106
2.10 Mezcla asfáltica drenante .....	108
2.11 Mezclas discontinuas en caliente o microaglomerados .....	111
2.12 Mezclas tibias .....	114
2.13 Mezclas asfálticas modificadas.....	135
2.14 Mezclas asfálticas recicladas en frío.....	138
2.15 Mezclas asfálticas recicladas en caliente .....	140
2.16 Bases estabilizadas con emulsión.....	142
2.17 Base o granular estabilizado con asfalto en caliente .....	145
2.18 Granular estabilizado con crudo de Castilla.....	147
2.19 Rígidez de mezclas asfálticas .....	150
3. Mecanismos de daño de mezclas asfálticas para el diseño.....	155
3.1 Ahuellamiento en mezclas asfálticas .....	155
3.1.1 Generalidades .....	155
3.1.2 Ensayos y equipos.....	159
3.1.3 Factores que afectan la resistencia a la deformación permanente .....	170
3.1.4 Ecuaciones para la predicción de la deformación permanente .....	191
3.2 Fatiga en mezclas asfálticas .....	197

3.2.1 Generalidades .....	197
3.2.2 Ensayos.....	200
3.2.3 Factores que afectan la resistencia a fatiga.....	211
3.2.4 Ecuaciones empíricas.....	244
3.3 Daño por humedad.....	254
<b>4. SUPERPAVE.....</b>	<b>257</b>
4.1 Generalidades .....	257
4.2 Niveles de diseño .....	258
4.3 Diseño de mezcla .....	262
4.4 Ensayos para evaluar el comportamiento de la mezcla diseñada .....	273
<b>5. Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas: estado del conocimiento.....</b>	<b>275</b>
5.1 Generalidades .....	275
5.2 Algunos estudios reportados.....	281
<b>6. Evaluación de pavimentos.....</b>	<b>297</b>
6.1 Inventario de daños .....	297
6.1.1 Fisuras.....	297
6.1.2 Deformaciones.....	306
6.1.3 Pérdida de las capas de la estructura.....	309
6.1.4 Daños superficiales .....	312
6.1.5 Otros.....	316
6.2 Inspección de obras de drenaje.....	318
6.3 Estado superficial a través del MDR.....	318
6.4 Determinación del PCI .....	323
6.5 Determinación de la irregularidad superficial.....	324
6.6 Determinación del PSI.....	329
6.7 Determinación del OPI.....	330
6.8 Determinación de la textura superficial.....	330
6.9 Evaluación estructural .....	333
6.9.1 Medidas de deflexión – Ensayos no destructivos .....	333
6.10 Ensayos destructivos.....	338
6.11 Determinación de la capacidad estructural.....	339
6.12 Exploración geotécnica.....	339
6.13 Medición de ruido.....	341
<b>7. Asfaltos modificados con caucho: estudio de su aplicación en Colombia.....</b>	<b>345</b>
7.1 Introducción .....	345
7.2 Generalidades .....	347
7.3 Especificaciones colombianas.....	349
7.4 Ventajas de la utilización del asfalto-GCR .....	352
7.5 Desventajas de la utilización del asfalto-GCR.....	357
7.6 Justificación de utilización en Colombia de mezclasasfálticas modificadas con GCR.....	358

---

Anexo A. Ficha técnica del crudo de Castilla .....	365
Anexo B. Especificación PG (AASHTO MP 1) .....	370
<b>8. Capas granulares: generalidades.....</b>	<b>371</b>
8.1 Base granular .....	371
8.2 Subbase granular .....	373
8.3 Controles constructivos de bases y subbases.....	374
8.4 Afirmados .....	375
8.5 Subrasante mejorada.....	377
8.6 Subrasante.....	380
8.6.1 CBR ( <i>Californian Bearing Ratio</i> ).....	380
8.6.2 Penetrómetro dinámico de cono (PDC) .....	384
8.6.3 Prueba de placa .....	385
8.6.4 Módulo resiliente.....	387
8.6.5 Estudios adicionales.....	393
<b>9. Aspectos para tener en cuenta de los granulares en los métodos de diseño de pavimentos flexibles.....</b>	<b>397</b>
9.1 Metodologías de diseño de pavimentos flexibles y especificaciones de materiales .....	398
9.1.1 Métodos de diseño empíricos .....	398
9.1.2 Métodos de diseño analíticos, mecanicistas o racionales.....	405
9.2 Nuevos métodos de análisis de pavimentos .....	408
9.2.1 Programas de elementos finitos (FEM).....	408
9.2.2 Programas de elementos discretos (DEM).....	411
<b>10. Comportamiento resiliente de materiales granulares.....</b>	<b>415</b>
10.1 Módulo resiliente.....	416
10.2 Factores que influyen en el comportamiento resiliente de materiales granulares gruesos.....	422
10.2.1 Influencia del esfuerzo.....	423
10.2.2 Influencia del contenido de agua .....	429
10.2.3 Influencia de la densidad.....	432
10.2.4 Influencia de la granulometría, tamaño máximo, cantidad de finos y forma de la partícula.....	433
10.2.5 Influencia del número, frecuencia de carga e historia de esfuerzo.....	439
10.2.6 Influencia del tipo de ensayo.....	440
10.2.7 Anisotropía.....	442
10.3 Ecuaciones resilientes (elásticas no lineales) para materiales granulares gruesos .....	446
10.4 Factores que influyen en el comportamiento resiliente de materiales fino-granulares.....	455
10.4.1 Influencia del esfuerzo.....	455
10.4.2 Influencia del contenido de agua.....	458

10.4.3 Influencia de la densidad.....	462
10.5 Ecuaciones resilientes (elásticas no lineales) para materiales fino-granulares.....	464
10.6 Síntesis.....	472
<b>11. Deformación permanente en materiales granulares no tratados.....</b>	<b>475</b>
11.1 Deformación permanente .....	475
11.2 Factores que influyen en la resistencia a la deformación permanente de materiales granulares gruesos .....	476
11.2.1 Influencia del esfuerzo.....	476
11.2.2 Influencia de la historia de esfuerzo .....	483
11.2.3 Influencia del contenido de agua .....	484
11.2.4 Influencia de la densidad .....	488
11.2.5 Influencia del número y frecuencia de carga.....	490
11.2.6 Influencia de la granulometría, tamaño máximo, cantidad de finos y forma de la partícula.....	492
11.2.7 Influencia del tipo de ensayo.....	496
11.3 Ecuaciones de deformación permanente para materiales granulares gruesos...	500
11.4 Factores que influyen en la resistencia a la deformación permanente de materiales fino-granulares .....	507
11.4.1 Influencia del esfuerzo.....	507
11.4.2 Influencia del contenido de agua .....	509
11.4.3 Influencia de la frecuencia de carga.....	511
11.5 Ecuaciones de deformación permanente en materiales fino-granulares.....	512
11.6 Síntesis.....	516
<b>12. Materiales ligados con cementantes hidráulicos.....</b>	<b>517</b>
12.1 Losa de concreto hidráulico para pavimento rígido .....	517
12.1.1 Generalidades .....	517
12.1.2 Elementos que conforman la losa .....	524
12.1.3 Mecanismos de daño en el diseño de pavimentos rígidos .....	532
12.1.4 Aspectos constructivos y especificaciones de materiales .....	534
12.2 Base de concreto hidráulico .....	542
12.3 Bases estabilizadas con cemento hidráulico.....	544
12.4 Suelo-cemento.....	546
12.5 Adoquines de concreto.....	549
<b>13. Diseño de pavimentos.....</b>	<b>553</b>
13.1 Variables de diseño .....	553
13.1.1 Subrasante.....	553
13.1.2 Tránsito.....	554
13.2 Método AASHTO (1993) - Pavimentos flexibles y semirrígidos .....	573
13.3 Método AASHTO (1993) – Pavimento rígido.....	581
13.4 Diseño racional para pavimento flexible, rígido y semirrígido (IDU & Universidad de los Andes, 2002) .....	585

## Materiales o ligantes asfálticos

Los productos asfálticos utilizados en pavimentos provienen de la destilación del petróleo crudo, ya sea en forma natural o industrial. Estos materiales ligan el agregado pétreo para conformar mezclas asfálticas y son los responsables de brindar, a la capa asfáltica, resistencia mecánica bajo carga monotónica, estática y/o cíclica, impermeabilidad y durabilidad. En Colombia el manejo ambiental de este tipo de materiales se puede consultar en Instituto Nacional de Vías - Invías (2013, INV. 400.4.7). Algunos tipos de asfaltos utilizados para la fabricación de mezclas asfálticas son:

- Cemento asfáltico.
- Emulsiones asfálticas.
- Asfaltos rebajados.
- Asfaltos modificados y multigrados.
- Asfaltos espumados.
- Crudos pesados.
- Asfaltitas o asfaltos naturales.

A continuación se hará una descripción resumida de los asfaltos más utilizados en el medio colombiano y en el mundo.

## 1.1 Cemento asfáltico

### 1.1.1 Generalidades

El cemento asfáltico se designa por las letras CA o AC (*Asphalt Cement* en un país anglosajón) y se clasifican por lo general de acuerdo con su consistencia evaluada a través de dos ensayos: penetración y viscosidad. Otra forma de clasificación, utilizada principalmente en países desarrollados, se realiza a través del grado de funcionamiento (PG por sus siglas en inglés).

En Colombia, a la fecha de publicación del presente documento, los CA se clasifican por lo general de acuerdo con su penetración (INV. E-706-13, ASTM D-5). Físicamente, los resultados de este ensayo pueden ser entendidos como la resistencia que experimenta el cemento asfáltico cuando se permite penetrar en él una aguja normalizada de 100 g de masa durante cinco segundos a una temperatura estándar (25 °C). Es decir, de manera directa mide la consistencia del CA y de manera indirecta evalúa su rigidez, entendiéndose que, bajo las mismas condiciones de ensayo, el CA más rígido será aquel en el cual la aguja penetre menos. Esta penetración se evalúa en 1/10 de mm, se mide en un «penetrómetro» (ver figura 1.1), y el procedimiento de ensayo puede ser consultado en la especificación INV. E-706-13 (ASTM D-5) del Instituto Nacional de Vías- Invías (2013a).

*Figura 1.1* Penetrómetro

