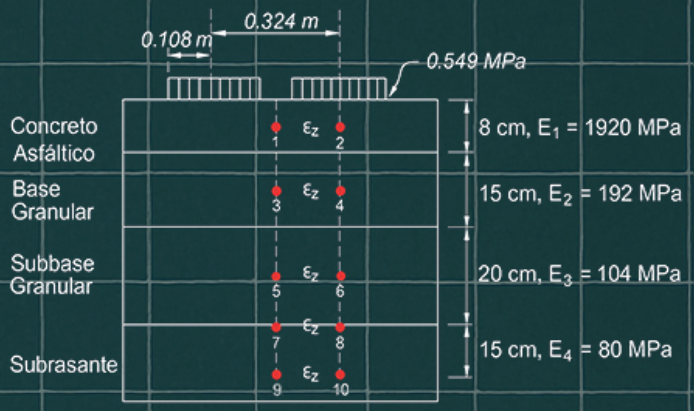
$$h = \frac{0.868 + (0.661 - 1.006\ J^2)\left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} \log N}{[1 + 0.204\ (R_E - 1)]} \left[\sqrt{\frac{\frac{P}{\pi r^2}}{\frac{s}{f_s}\left(1 - 0.9\, e^{-\left[\left(\frac{r}{h}\right)^2\right]}\right) N_c \bullet f_c \bullet CBR_{sr}}} - 1 \right]$$

$$log N_f = 11.737 - 12.077 \bullet \left(\frac{\sigma_{eq}}{S_c}\right) \quad \frac{\sigma_{eq}}{S_c} \geq 0.55$$

$$N_f = \left[\frac{4.2577}{\left(\frac{\sigma_{eq}}{S_c}\right) - 0.4325}\right]^{3.268} \quad 0.45 < \frac{\sigma_{eq}}{S_c} < 0.55$$

$$N_f = ilimitado; \frac{\sigma_{eq}}{S_c} \leq 0.45$$



Diseño de pavimentos: Variables fundamentales, materiales y métodos de diseño

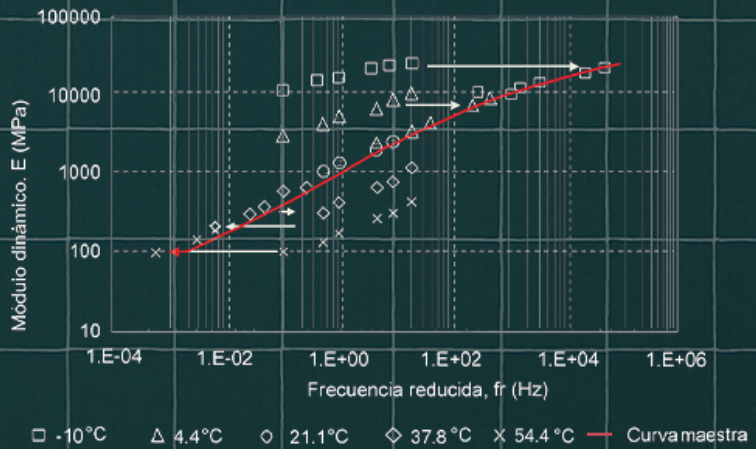
Edwin Antonio Guzmán Suárez

$$M_r = K_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a}\right]^{K_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right]^{K_3}$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

$$\theta_w = c(h) \bullet \left[\frac{\theta_{sat}}{\left[ln\left[exp(1) + \left(\frac{h_m}{a_f}\right)^{b_f}\right]\right]^{c_f}}\right]$$

$$c(h) = \left[1 - \frac{ln\left(1 + \frac{h_m}{h_r}\right)}{ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)}\right]$$



Juan de Castellanos
Fundación Universitaria
VIGILADA MINEDUCACIÓN
EDITORIAL

Directivos
Fundación Universitaria Juan de Castellanos

Rector
Carlos Eduardo Castiblanco Sierra Pbro.

Vicerrector Académico
Oswaldo Martínez Mendoza, Pbro.

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas
Dr. John Alexander Bohada Jaime

Primera edición, 2026

Autor:
Edwin Antonio Guzmán Suárez

Editorial Fundación Universitaria Juan de Castellanos

Editora:
Sandra Liliana Acuña Gonzalez

Carrera 11 # 11-44
Tunja, Boyacá, Colombia
PBX: (8)7458676 Ext. 1128
editor@jdc.edu.co

Como citar:
Guzmán-Suárez E-A (2025). Diseño de pavimentos: Variables fundamentales, materiales y métodos de diseño. Editorial Fundación Universitaria Juan de Castellanos.

Corrección de estilo y lectura de pruebas:
Alfredo de Jesús Mendoza Escalante

Diseño de carátula y diagramación:
ShapeArts
3115604656
Tunja, Boyacá, Colombia
Publicado en Colombia

ISBN: 978-958-8966-82-3
DOI:

Material publicado de acuerdo con los términos de la licencia Creative Commons Attribution Non Commercial – No Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0). Usted es libre de copiar o redistribuir el material en cualquier medio o formato, siempre y cuando dé los créditos apropiadamente. No lo haga con fines comerciales y no realice obras derivadas.

Contenido

1. Generalidades 29
1.1 Aspectos generales de los pavimentos 29
1.1.1 Eventos históricos 29
1.1.2 Definición de pavimento 30
1.1.3 Características de los pavimentos 30
1.1.3.1 Características estructurales 30
1.1.3.2 Características sociales 30
1.1.4 Tipos de pavimentos 31
1.1.4.1 Pavimentos flexibles 31
1.1.4.2 Pavimentos semirígidos 32
1.1.4.3 Pavimentos rígidos 32
1.1.4.4 Pavimentos articulados 34
1.2 Factores a considerar en el diseño 34
1.2.1 Periodo de diseño 35
1.2.2 El tránsito 35
1.2.3 La subrasante 36
1.2.4 El clima 37
1.2.5 Materiales disponibles 38
1.2.6 Unidades de diseño 38
1.2.7 Tipos de falla estructural y funcional 38
1.2.8 El pavimento en el proyecto de una carretera 39
1.2.9 El diseño como un proceso económico de optimización 44
1.2.10 Nivel de detalle de la información requerida para el diseño 46
1.3 Factores ambientales y climáticos 49
1.3.1 Humedad 50
1.3.1.1 Índice de Thornthwaite – TMI 50
1.3.1.2 Succión matricial a partir de TMI 60
1.3.1.3 Parámetros de los materiales compactados 64
1.3.1.4 Curva característica del suelo 64
1.3.1.5 Factor ambiental para ajuste del módulo resiliente 74
1.3.2 Temperatura 78
1.4 Funcionamiento de los pavimentos 79
1.4.1 Características de la carga 80
1.4.1.1 Tipos de ejes y carga 80
1.4.1.2 Presión de inflado 80
1.4.1.3 Área de carga o contacto 80
1.4.2 Propiedades físicas de los materiales 82
1.4.2.1 Módulo de elasticidad 82
1.4.2.2 Coeficiente de Poisson 82
1.4.3 Pavimentos flexibles 82
1.4.3.1 Concepto de sistema multicapa 83
1.4.3.2 Sistema de una capa 85
1.4.3.3 Sistema de dos capas 89
1.4.3.4 Sistema de tres capas 91
1.4.3.5 Ejemplos de aplicación mecánica de pavimentos flexibles 93

1.4.4 Pavimentos rígidos **96**
1.4.4.1 Esfuerzos debidos a la fricción *96*
1.4.4.2 Esfuerzos por cambios no uniformes de temperatura – alabeo *96*
1.4.4.3 Esfuerzos debidos a las cargas del tránsito *99*
1.4.4.4 Deflexiones debidas a las cargas del tránsito *101*
1.4.5 Pavimentos articulados **105**
1.5 Referencias **106**
2. EL TRÁNSITO **130**
2.1 Definiciones **130**
2.2 Clasificación vehicular **131**
2.2.1 Clasificación de acuerdo al sistema de propulsión **131**
2.2.2 Designación **132**
2.2.3 Cargas máximas por tipo de eje **133**
2.2.4 Cargas máximas legales **133**
2.3 Distribución porcentual del tránsito **134**
2.4 Distribución direccional y por carril del tránsito **137**
2.4.1 Factor de distribución direccional (Fd) **137**
2.4.2 Factor de distribución por carril (Fca) **138**
2.5 Factor de Equivalencia de Carga por tipo Eje (FECE) **138**
2.5.1 Factores de equivalencia AASHTO **138**
2.5.2 Método simplificado o de la cuarta potencia **139**
2.5.3Método mecanístico empírico **140**
2.6 Factores de Deterioro por Vehículo Comercial (FDV) **141**
2.6.1 Ejemplo de aplicación método simplificado o de la cuarta potencia **142**
2.7 Factor camión (Fc) **143**
2.7.1 Ejemplo de aplicación **144**
2.8 Espectros de carga **146**
2.9 Estimación del tránsito de diseño **146**
2.9.1 Nivel 1. Tránsito de diseño cuando no se dispone de series históricas de aforos vehiculares **152**
2.9.1.1 Ejes equivalentes en el carril de diseño durante el periodo de diseño *152*
2.9.1.2 Ejes equivalentes en el año base *153*
2.9.1.3 Ejes equivalentes en el año de medición corregido por el tiempo entre este y la puesta en servicio *155*
2.9.1.4 Corrección del tránsito proyectado para una confiabilidad superior a 50% en la determinación del número de ejes equivalentes *156*
2.10 Rangos del tránsito **159**
2.11 Ejemplo de estimación del tránsito con verificación de la saturación en el periodo de diseño **160**
2.12 Ejemplo de estimación del tránsito para nivel 1 ..... **164**
2.12.1 Aforo de volúmenes vehiculares **165**
2.12.2 Corrección por estacionalidad **165**
2.12.3 Datos para el diseño **166**

2.12.4 Cálculo de los distintos parámetros **167**
2.13 Ejemplo de estimación del tránsito para nivel 2 ..... **168**
2.14 Referencias **175**
3. LA SUBRASANTE **176**
3.1 Exploración de la subrasante **176**
3.1.1 Estudio geotécnico **176**
3.1.2Ensayos de campo **177**
3.1.2.1 Penetrómetro Dinámico de Cono (INV E-172-13) *178*
3.1.2.2 Relación de Soporte de California - CBR con muestras inalteradas (INV E-148-13) *179*
3.1.2.3 Relación de Soporte de California - CBR de campo (INV E-169-13) *179*
3.1.2.4 Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer - FWD) *180*
3.1.2.5 Deflectómetro de Impacto Liviano – LWD (INV E-826-22) (Osorio, 2008) *181*
3.1.2.6Ensayo de placa (INV E-168-13) *182*
3.1.2.7 Densidad con cono y arena (INV E-161-13) *184*
3.1.2.8 Densidad con densímetro nuclear (INV E-164-13) *185*
3.1.3Ensayos de laboratorio **186**
3.1.3.1 Contenido de humedad (INV E-122-13) *187*
3.1.3.2 Determinación del tamaño de las partículas (INV E-123-13) *187*
3.1.3.3 Relación de soporte de california - CBR (INV E-148-13) *188*
3.1.3.4 Módulo resiliente (INV E-156-13) *189*
3.1.3.5 Índices de consistencia *191*
3.1.4Clasificación de suelos **193**
3.1.4.1 Sistema de clasificación de suelos AASHTO (INV E-180-13) *194*
3.1.4.2 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - SUCS (INV E-181-13) *197*
3.1.4.3 Sistema de clasificación de suelos RAMCODES *201*
3.1.4.4 Ejemplo de aplicación clasificación de suelos *202*
3.2 Compactación de suelos **205**
3.2.1 Relaciones gravimétricas y volumétricas **205**
3.2.2 Principios fundamentales de la compactación **209**
3.2.3 Factores que afectan la compactación **210**
3.2.4 Compactación en laboratorio **212**
3.2.4.1 Prueba de compactación normal o estándar (INV E-141-13) *212*
3.2.4.2 Prueba de compactación modificada (INV E-142-13) *213*
3.2.4.3 Resumen del ensayo *213*
3.2.4.4 Ejemplo de aplicación compactación en laboratorio *219*
3.2.5 Compactación en campo **224**
3.2.5.1 Tipos de compactadores *224*
3.2.5.2 Especificaciones para la compactación en campo *227*
3.2.5.3 Verificación de la compactación en campo *227*
3.2.5.4 Ejemplo de aplicación verificación de la compactación en campo *231*
3.3 Caracterización de la resistencia de la subrasante **235**
3.3.1 Relación de Soporte de California - CBR (INV E-148-13) **235**
3.3.1.1 Resumen del ensayo *235*
3.3.1.2 Densidad seca de equilibrio y humedad de equilibrio de la subrasante *239*
3.3.1.3 Ejemplo de aplicación CBR en suelos granulares *257*
3.3.1.4 Ejemplo de aplicación CBR en suelos cohesivos *261*

3.3.2 Penetrómetro Dinámico de Cono - PDC (INV E-172-13) **267**
3.3.2.1 Resumen del ensayo *267*
3.3.2.2 Ejemplo de aplicación PDC *271*
3.3.3 Módulo resiliente **273**
3.3.3.1 Módulo resiliente en laboratorio de suelos de subrasante *273*
3.3.3.2 Módulo resiliente y de superficie en campo de suelos de subrasante *277*
3.3.3.3 Expresiones de correlación entre el M_r y el CBR *285*
3.3.4 Módulo de reacción **286**
3.3.4.1 Correlación del módulo de reacción con el CBR *287*
3.3.5 Recomendaciones para evaluar la resistencia de la subrasante **289**
3.4 Unidades homogéneas de diseño **290**
3.4.1 Método objetivo para la definición de unidades homogéneas de diseño **290**
3.4.2 Método subjetivo para la definición de unidades homogéneas de diseño **294**
3.4.3 Selección del valor de resistencia de la subrasante **295**
3.4.3.1 Criterio de la media *296*
3.4.3.2 Criterio del Instituto del Asfalto *298*
3.5 Especificaciones de construcción **300**
3.5.1 Requisitos de calidad **301**
3.5.2 Proceso constructivo **303**
3.5.2.1 Desmonte y limpieza (Desbroce) *303*
3.5.2.2 Descapote *303*
3.5.2.3 Escarificado *303*
3.5.2.4 Extendido *303*
3.5.2.5 Humectación o desecación *304*
3.5.2.6 Compactación del terraplén *304*
3.5.2.7 Terminación del terraplén *305*
3.5.2.8 Controles *305*
3.5.3 Verificación y aceptación de la compactación **307**
3.5.3.1 Especificaciones INVÍAS *307*
3.5.3.2 Método RAMCODES *313*
3.6 Referencias **318**
4. Materiales para pavimentos **320**
4.1 Estabilización de suelos **320**
4.1.1 Generalidades **320**
4.1.1.1 Definición *320*
4.1.1.2 Estabilización mecánica *321*
4.1.1.3 Estabilización física *321*
4.1.1.4 Estabilización química *321*
4.1.1.5 Beneficios de la estabilización *321*
4.1.1.6 Selección del agente estabilizante a utilizar *321*
4.1.1.7 Mejoramiento de la subrasante *325*
4.1.2 Estabilización mecánica - estabilización granular **327**
4.1.2.1 Ejemplo de aplicación mezcla de dos materiales *327*
4.1.2.2 Ejemplo de aplicación mezcla de tres materiales *334*
4.1.3 Estabilización con cal **342**
4.1.4 Estabilización con cemento **342**

4.1.4.1 Dosificación de mezclas de suelo-cemento 343
4.1.4.2 Ejemplo de aplicación dosificación de mezclas de suelo-cemento 354
4.1.4.3 Diseño de espesores de suelo-cemento 360
4.2 Producción de agregados 364
4.2.1 Actividades para la utilización de agregados 365
4.2.2 Equipos para la producción de agregados 368
4.2.3 Ejemplo de aplicación selección del equipo de trituración 372
4.3 Caracterización de materiales 384
4.3.1 Carta de gradación para geomateriales - RAMCODES 384
4.3.2 Caracterización de suelos granulares no ligados de subbase y base 388
4.3.2.1 Ensayo de módulo resiliente en suelos granulares 388
4.3.2.2 Caracterización a partir del módulo de la capa de apoyo y espesores del pavimento 398
4.3.3 Diseño de mezclas asfálticas 400
4.3.3.1 Diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall 400
4.3.3.2 Diseño de mezclas asfálticas por el método RAMCODES 421
4.3.3.3 Dosificación de mezclas asfálticas por el método Bailey 425
4.3.3.4 Carta de gradación para la mezcla asfáltica - RAMCODES 435
4.3.4 Caracterización de la mezcla de concreto asfáltico 438
4.3.4.1 Módulo resiliente 438
4.3.4.2 Módulo dinámico complejo 439
4.3.4.3 Módulo dinámico de rigidez 441
4.3.4.4 Módulo mediante correlaciones 442
4.3.4.5 Módulo mediante nomogramas 450
4.3.4.6 Curva maestra del módulo dinámico 454
4.4 Proceso constructivo de capas granulares 461
4.4.1 Acordonado del material granular 461
4.4.2 Compactación de la capa granular 462
4.4.3 Calidad del producto terminado 462
4.4.4 Requisitos de calidad de capas granulares 463
4.4.5 Expresiones de cálculo a tener en cuenta en el proceso constructivo 463
4.4.5.1 Relación de densidades 463
4.4.5.2 Determinación de la separación de descarga de las volquetas para el acordonado 464
4.4.5.3 Determinación del espesor en estado suelto para la compactación de la capa de material granular 466
4.4.5.4 Determinación de la cantidad de agua requerida para la compactación 467
4.4.5.5 Velocidad del carrotanque irrigador 468
4.5 Referencias 470
5 Diseño de pavimentos flexibles 472
5.1 Método AASHTO para el diseño de pavimentos flexibles 472
5.1.1 Tránsito 472
5.1.1.1 Factores de equivalencia de carga por tipo de eje 472
5.1.1.2 Factores de deterioro vehicular 484
5.1.2 Consideraciones climáticas 484
5.1.3 Resistencia de la fundación 484
5.1.4 Nivel de confianza, R 486

5.1.5 Desviación estándar, S_0 487
5.1.6 Variación del índice de serviciabilidad, ΔPSI 488
5.1.7 Número estructural de diseño 488
5.1.8 Caracterización de materiales 489
5.1.8.1 Coeficientes estructurales de las capas de pavimento, a_i 489
5.1.8.2 Coeficientes de drenaje de las capas granulares de pavimento, m_i 496
5.1.9 Espesores mínimos de diseño 500
5.1.10 Ejemplo de aplicación diseño pavimento flexible - método AASHTO 93 500
5.2 Método empírico-mecanicista para el diseño de pavimentos flexibles 504
5.2.1 Tránsito 505
5.2.1.1 Presión de contacto 505
5.2.1.2 Radio de carga 505
5.2.1.3 Separación entre llantas 506
5.2.2 Caracterización de materiales 506
5.2.2.1 Módulo de materiales granulares 506
5.2.2.2 Módulo de la mezcla de concreto asfáltico 507
5.2.2.3 Coeficiente de Poisson 508
5.2.3 Verificación del diseño 508
5.2.3.1 Modelos de deterioro 509
5.2.3.2 Solicitaciones en servicio - modelación mediante BISAR 3.0 525
5.2.4 Ejemplo de aplicación diseño pavimento flexible - método mecanicista 526
5.3Referencias 535
6. Diseño de pavimentos rígidos 537
6.1 Método AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos 537
6.1.1 Tránsito 538
6.1.1.1 Factores de equivalencia de carga pavimentos rígidos 538
6.1.1.2 Factores de deterioro vehicular 549
6.1.2 Condiciones climáticas 549
6.1.3 Nivel de confianza, R % 549
6.1.4 Desviación estándar, S_0 550
6.1.5 Variación del índice de serviciabilidad, ΔPSI 550
6.1.6 Módulo de rotura del concreto, S'_c 551
6.1.7 Coeficiente de drenaje, C_d 552
6.1.8 Coeficiente de transferencia de carga, J 552
6.1.9 Módulo de elasticidad, E_c 553
6.1.10 Pérdida de soporte, L_s 553
6.1.11 Resistencia de la fundación 554
6.1.11.1 Módulo de reacción de la subrasante, K_s 555
6.1.11.2 Módulo de reacción compuesto de la subrasante, K_c 556
6.1.11.3 Módulo de reacción de la subrasante corregido, Kcc 557
6.1.11.4 Módulo de reacción promedio compuesto corregido, K_{cc} 558
6.1.11.5 Módulo de reacción de la subrasante efectivo, K 559
6.1.12 Ejemplo de aplicación diseño pavimento rígido - método AASHTO 93 561
6.2 Método PCA para el diseño de pavimentos rígidos 566
6.2.1 Resistencia del concreto a la flexión, MR 567

6.2.2 Soporte de la subrasante y la subbase, K....568
6.2.3 Tránsito....569
6.2.3.1 Periodo de diseño....569
6.2.3.2 Proyección del tránsito....569
6.2.3.3 Tránsito promedio diario en ambas direcciones de los vehículos comerciales (TPD_{VC})....570
6.2.3.4 Distribución direccional de los camiones, Fd....570
6.2.3.5 Factor de distribución de los camiones por carril, Fca....570
6.2.3.6 Distribución de las cargas por eje....571
6.2.3.7 Factores de seguridad de carga....571
6.2.4 Procedimiento de diseño mediante cartas cuando se dispone de las cargas por eje....571
6.2.4.1 Análisis de fatiga....572
6.2.4.2 Análisis de erosión....572
6.2.5 Procedimiento de diseño mediante ecuaciones cuando se dispone de las cargas por eje....573
6.2.5.1 Análisis de fatiga....573
6.2.5.2 Análisis de erosión....575
6.2.6 Ejemplo de aplicación mediante cartas de diseño....578
6.2.6.1 Estimación del tránsito y las cargas de diseño....578
6.2.6.2 Procedimiento para el cálculo del espesor de la losa....582
6.2.7 Ejemplo de aplicación mediante ecuaciones de diseño....602
6.2.7.1 Análisis de fatiga....603
6.2.7.2 Análisis de erosión. Presión en la interfase losa – fundación....605
6.2.8 Verificación de esfuerzos y deflexiones en la losa....609
6.2.9 Elementos de diseño complementarios....613
6.2.9.1 Esquema básico del diseño del pavimento....613
6.2.9.2 Dovelas y barras de anclaje....613
6.2.9.3 Juntas....616
6.2.9.4 Estructura de pavimento diseñada....620
6.3 Referencias....621
7. Diseño de otros tipos de pavimentos....623
7.1 Método para el diseño de pavimentos articulados....623
7.1.1 Capacidad de soporte de la subrasante....623
7.1.2 Tránsito....623
7.1.2.1 Número del tránsito para el diseño, NTD8.2t....623
7.1.2.2 Factor de ajuste del tránsito de vehículos comerciales, FA....624
7.1.3 Determinación de espesores....624
7.1.3.1 Espesor integral del pavimento....624
7.1.3.2 Determinación de la capa de rodadura....624
7.1.3.3 Alternativas estructuralmente equivalentes....625
7.1.4 Ejemplo de aplicación....626
7.1.4.1 Tránsito de diseño....626
7.1.4.2 Cálculo del espesor total en concreto asfáltico....627
7.1.4.3 Cálculo del espesor de la capa de rodadura....627
7.1.4.4 Cálculo del espesor de las capas intermedias....627
7.2 Métodos para el diseño de pavimentos en material granular....628

7.2.1 Método de Peltier **628**
7.2.2 Método de Transportation Resarch Laboratory - TRL **629**
7.2.3Método AUSTROADS **629**
7.2.3.1 Tránsito de diseño entre 10^5 y 10^8 ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño en el periodo de diseño *630*
7.2.3.2 Tránsito de diseño menor a 10^5 ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño en el periodo de diseño *630*
7.2.4 Método Edwin Guzmán **630**
7.3 Métodos para el diseño de pavimentos con geomalla **633**
7.3.1Pavimentos con superficie de rodadura en material granular **633**
7.3.2 Pavimentos con superficie de rodadura en concreto asfáltico **636**
7.3.2.1 Métodos de diseño basados en LCR *636*
7.3.2.2 Método de diseño basado en TIF *640*
7.4 Referencias **646**

Lista de Cuadros

1. Generalidades..... 29

Cuadro 1. *Periodo de diseño (INVÍAS, 2015)..... 35*
Cuadro 2. *Nivel del tránsito..... 36*
Cuadro 3. *Objetivos de los estudios geológico-geotécnicos (González et al., 2002)..... 44*
Cuadro 4. *Requerimiento de las variables de diseño según el nivel de información (adaptado de INVÍAS, 2015)..... 47*
Cuadro 5. *Factores del clima que afecta a los pavimentos (INVÍAS, 2015)..... 50*
Cuadro 6. *Valores de N..... 52*
Cuadro 7. *Clasificación según índice de Thornthwaite (INVÍAS, 2015)..... 55*
Cuadro 8. *Promedio de valores mensuales totales de precipitación y temperatura..... 56*
Cuadro 9. *Evapotranspiración potencial total anual..... 57*
Cuadro 10. *Valores del índice de Thornthwaite para cada mes..... 59*
Cuadro 11. *Constantes de regresión para el modelo TMI-P200/wPI (INVÍAS, 2015)..... 61*
Cuadro 12. *Parámetros del modelo - suelo considerado como plástico..... 62*
Cuadro 13. *Constantes de regresión para el modelo TMI-P_{200} (INVÍAS, 2015)..... 63*
Cuadro 14. *Valores de $a,b,$ y k_m para el cálculo del factor ambiental, F_{amb} (INVÍAS, 2015)..... 76*
Cuadro 15. *Categorías del clima por temperatura (INVÍAS, 2007)..... 79*
Cuadro 16. *Relaciones entre q y P_i..... 81*
Cuadro 17. *Esfuerzos, deformaciones y deflexiones para un sistema de una capa (Yoder & Witczak, 1975)..... 88*
Cuadro 18. Valores de *(ZZ1-RR1), (ZZ2-RR2), (ZZ2-RR3)..... 95*
Cuadro 19. Valores de la función de elasticidad A para una capa (Yoder & Witczak, 1975, p. 30)..... 108
Cuadro 20. Valores de la función de elasticidad B para una capa (Yoder & Witczak, 1975, p. 31)..... 109
Cuadro 21. Valores de la función de elasticidad C para una capa (Yoder & Witczak, 1975, p. 32)..... 110
Cuadro 22. Valores de la función de elasticidad D para una capa (Yoder & Witczak, 1975, p. 33)..... 111
Cuadro 23. Valores de la función de elasticidad E para una capa (Yoder & Witczak, 1975, p. 34)..... 112
Cuadro 24. Valores de la función de elasticidad F para una capa (Yoder & Witczak, 1975, p. 35)..... 113
Cuadro 25. Valores de la función de elasticidad F para una capa (Yoder & Witczak, 1975, p. 35)..... 114
Cuadro 26. Valores de la función de elasticidad H para una capa (Yoder & Witczak, 1975, p. 37)..... 115
Cuadro 27. Factores de esfuerzo tricapa. Para H = 0.125 con K_1 = 2 a 200 y K_2 = 2 a 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 64)..... 123
Cuadro 28. Factores de esfuerzo tricapa. Para H = 0.25 con K_1 = 2 a 200 y K_2 = 2 a 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 65)..... 124
Cuadro 29. Factores de esfuerzo tricapa. Para H = 0.50 con K_1 = 2 a 200 y K_2 = 2 a 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 66)..... 125
Cuadro 30. Factores de esfuerzo tricapa. Para H = 1.0 con K_1 = 2 a 200 y K_2 = 2 a 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 67)..... 126
Cuadro 31. Factores de esfuerzo tricapa. Para H = 2.0 con K_1 = 2 a 200 y K_2 = 2 a 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 68)..... 127

Cuadro 32. Factores de esfuerzo tricapa. Para H = 4.0 con K_1 = 2 a 200 y K_2= 2 a 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 69) 128
Cuadro 33. Factores de esfuerzo tricapa. Para H = 8.0 con K_1 = 2 a 200 y K_2 = 2 a 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 70) 129
2. EL TRÁNSITO 130
Cuadro 1. Designación de los vehículos de carga de acuerdo con la configuración de sus ejes 132
Cuadro 2. Cargas máximas por tipo de eje 133
Cuadro 3. Cargas máximas por tipo de eje 133
Cuadro 4. Clasificación vehicular. (Adaptado de Instituto Nacional de Vías. [INVÍAS], 2007, p. 12) 135
Cuadro 5. Composición vehicular típica del tránsito (Adaptado de INVÍAS, 2007, p. 12; INVÍAS, 2015, p. 24) 137
Cuadro 6. Factor direccional a adoptar en función del ancho de calzada (INVÍAS, 2007, p. 9) 137
Cuadro 7. Factor de distribución para el carril de diseño 138
Cuadro 8. Cargas de referencia (INVÍAS, 2008, p. 37) 140
Cuadro 9. Factores de deterioro vehicular (Adaptado de INVÍAS, 2007, p. 11; INVÍAS, 2015, p. 42) 143
Cuadro 10. Cálculo de factor camión a partir de información de pesajes (INVÍAS, 2008, p. 44) 144
Cuadro 11. Cálculo de factor camión a partir de la distribución porcentual de los vehículos comerciales y los factores de deterioro vehicular 145
Cuadro 12. Factores de equivalencia vehicular 149
Cuadro 13. Valores de K para distintos niveles de confianza 151
Cuadro 14. Porcentaje de tránsito generado como función del tránsito normal (INVÍAS, 2007, p. 31) 155
Cuadro 15. Tasa de crecimiento del tránsito (Adaptado de INVÍAS, 2007, p. 7; INVÍAS, 2008, p. 39) 155
Cuadro 16. Tránsito equivalente diario pronosticado (INVÍAS, 2015, p. 34) 157
Cuadro 17. Cálculo del error de pronóstico (INVÍAS, 2015, p. 36) 158
Cuadro 18. Cálculo del tránsito corregido (INVÍAS, 2015, p. 36) 159
Cuadro 19. Rangos del tránsito considerados en los manuales. (Adaptado de INVÍAS, 2007, p. 7; INVÍAS, 2015, p. 41) 160
Cuadro 20. Composición vehicular, FEV y FDV 160
Cuadro 21. Volúmenes de tránsito 161
Cuadro 22. TPDA en el carril de diseño 162
Cuadro 23. Número de ejes equivalentes de diseño 164
Cuadro 24. Tránsito Promedio Diario Estimado 165
Cuadro 25. Factores de ajuste por estacionalidad 165
Cuadro 26. Información general de la serie histórica de tránsito 169
Cuadro 27. Valores de tránsito equivalente diario 170
Cuadro 28. Tránsito equivalente diario estimado por el modelo asumido 171
Cuadro 29. Comparación de tránsitos equivalentes diarios 171
Cuadro 30. Cálculo de la diferencia al cuadrado de cada año y el valor promedio de los años 172
Cuadro 31. Resumen del cálculo del tránsito equivalente normal con nivel de confianza .. 173

3. LA SUBRASANTE 176

Cuadro 1. Comportamiento del suelo en función del IL y el IC 192
Cuadro 2. Resumen del sondeo 193
Cuadro 3. Resumen de la exploración 193
Cuadro 4. Clasificación de suelos por el método AASHTO 196
Cuadro 5. Clasificación de suelos por el método SUCS 200
Cuadro 6. F_p relacionado con la clasificación cualitativa 201
Cuadro 7. F_{np} relacionado con la clasificación cualitativa 202
Cuadro 8. Características de las curvas de compactación (Das & Sobhan, 2018) 212
Cuadro 9. Métodos para realizar el ensayo de compactación normal y modificada 213
Cuadro 10. Cálculo para la curva de saturación del 100% 221
Cuadro 11. Cálculos en el ensayo de compactación 222
Cuadro 12. Volumen mínimo del hueco de ensayo 228
Cuadro 13. Cálculos en el ensayo de densidad con cono y arena 233
Cuadro 14. Datos compactación 243
Cuadro 15. Densidad seca para varios contenidos de humedad 243
Cuadro 16. Gravedades específicas 245
Cuadro 17. Granulometría del suelo 248
Cuadro 18. Límites de consistencia 248
Cuadro 19. Humedad natural 248
Cuadro 20. Datos del Proctor modificado 248
Cuadro 21. Densidad y humedad de equilibro método ingenieros Ruiz y Santángelo 255
Cuadro 22. Resultados ensayo de compactación para CBR 257
Cuadro 23. Resultados ensayo de expansión y penetración 259
Cuadro 24. Resultados ensayo de CBR 261
Cuadro 25. Datos para trazar la curva de saturación del 100% 265
Cuadro 26. Datos para trazar la curva de saturación del 100% 265
Cuadro 27. Datos para trazar las curvas de humedad 266
Cuadro 28. Formato para registro de datos del PDC 269
Cuadro 29. Resultados ensayo de módulo resiliente 275
Cuadro 30. Factor de ajuste empleado por agencias de transporte en Estados Unidos 278
Cuadro 31. Deflexiones medidas con FWD 279
Cuadro 32. Módulo de superficie 280
Cuadro 33. Valores típicos del Coeficiente de Poisson 281
Cuadro 34. Factor de distribución de esfuerzos para diferente tipo de suelos 282
Cuadro 35. Resultados ensayo E_{LWD} con LWD 285
Cuadro 36. Valores de k relación lineal entre el M_r y el CBR 285
Cuadro 37. Valores de k_1 y k_2 relación no lineal entre el M_r y el CBR 286
Cuadro 38. Cálculos en el ensayo de placa 287
Cuadro 39. Rangos de valores de K para diferentes tipos de suelo 288
Cuadro 40. Recomendaciones para evaluar la resistencia de la subrasante 289
Cuadro 41. Solución tabulada de la aproximación sucesiva de las diferencias acumuladas 291
Cuadro 42. Resumen de la exploración geotécnica 291
Cuadro 43. Unidades homogéneas por el método de diferencias acumuladas 292
Cuadro 44. CBR inalterado para la primera unidad homogénea de diseño 297
Cuadro 45. Percentil para determinar el parámetro de resistencia de diseño 298
Cuadro 46. Valores de CBR ordenados de menor a mayor 299
Cuadro 47. Valores de CBR ordenados de menor a mayor 302

Cuadro 48. Requisitos de calidad para la conformación de un pedraplén 302
Cuadro 49. Espesor de la tongada en función del equipo y tipo de material (NTE-ADE Explanaciones) 305
Cuadro 50. Criterios de aceptación para capas de terraplén y pedraplén 306
Cuadro 51. Selección de sitios de ensayo para el control de la compactación 309
Cuadro 52. Resultados del ensayo de densidades con cono y arena en el terreno 310
Cuadro 53. Grado de compactación individual 311
Cuadro 54. Grado de compactación del lote 312
Cuadro 55. Criterio de aceptación 313
Cuadro 56. Resultados ensayo de CBR 314
Cuadro 57. Grado de compactación en función de la saturación y el CBR 316

4. Materiales para pavimentos 320

Cuadro 1. Tipo de estabilización y su efecto 320
Cuadro 2. Guía para la selección del aditivo estabilizador 322
Cuadro 3. Propiedades de los suelos a estabilizar 324
Cuadro 4. Clasificación de los suelos de estudio 324
Cuadro 5. Granulometría y plasticidad de los materiales 327
Cuadro 6. Granulometría obtenida para la mezcla de dos materiales 329
Cuadro 7. Método aritmético para la mezcla de dos materiales 330
Cuadro 8. Método con Solver de Excel para la mezcla de dos materiales 332
Cuadro 9. Granulometría y plasticidad de los materiales 335
Cuadro 10. Distribución en fracciones de los materiales 336
Cuadro 11. Granulometría obtenida para la mezcla de tres materiales 338
Cuadro 12. Coeficientes, términos independientes y variables del método aritmético 338
Cuadro 13. Datos para el método aritmético mezcla de tres materiales 339
Cuadro 14. Método con Solver de Excel para la mezcla de tres materiales 340
Cuadro 15. Variables para calcular el índice de plasticidad de la mezcla 341
Cuadro 16. Denominación de la gradación del material (ICPC, 1990) 344
Cuadro 17. Porcentaje de cemento inicial 346
Cuadro 18. Contenido de cemento probable para suelos arenosos no orgánicos (A-1, A-3, A-2-4, A-2-5) 347
Cuadro 19. Contenido de cemento probable para suelos limosos y arcillosos (A-1, A-3, A-2-4, A-2-5) 348
Cuadro 20. Porcentaje de humedad retenida en el cuerpo de prueba 349
Cuadro 21. Pérdida máxima en ensayo de durabilidad 349
Cuadro 22. Geometría briquetas para resistencia a la compresion simple 352
Cuadro 23. Tamizado .....
Cuadro 24. Hidrómetro 354
Cuadro 25. Granulometría del suelo 355
Cuadro 26. Ensayo de compactación mezcla de suelo - cemento 358
Cuadro 27. Resistencia a la compresión simple 359
Cuadro 28. Tránsito de diseño 362
Cuadro 29. Cálculo del factor de fatiga 364
Cuadro 30. Denominación de los productos de preparación 366
Cuadro 31. Categorías de propiedades de agregados 367
Cuadro 32. Correlación calidad – petrología – ensayos índices 367
Cuadro 33. Granulometría del material de greña 372
Cuadro 34. Capacidades de las quebradoras de quijadas 373

Cuadro 35. Balance granulométrico trituración primaria 374
Cuadro 36. Capacidades de las trituradoras secundarias de cono tipo S 375
Cuadro 37. Balance granulométrico trituración secundaria 376
Cuadro 38. Capacidades de las trituradoras terciarias de cono tipo FC 377
Cuadro 39. Balance granulométrico trituración final 378
Cuadro 40. Capacidad de las cribas vibratorias factores A y B 379
Cuadro 41. Capacidad de las cribas vibratorias factores C, D, E y F 380
Cuadro 42. Especificaciones y capacidades de los alimentadores vibratorios 382
Cuadro 43. Franjas granulométricas del material de afirmado 386
Cuadro 44. Franjas granulométricas del material de subbase granular 386
Cuadro 45. Franjas granulométricas del material de base granular 387
Cuadro 46. Valores de estado de esfuerzos para base y subbase granular 389
Cuadro 47. Valores de K_1 y K_3 para base y subbase granular 389
Cuadro 48. Características del suelo 392
Cuadro 49. Resultados del ensayo de módulo resiliente 393
Cuadro 50. Parámetros para realizar la regresión lineal múltiple 393
Cuadro 51. Resultados del análisis estadístico 394
Cuadro 52. Estructura diseñada 396
Cuadro 53. Valores típicos de K_1 para capas de base y subbase (INVÍAS, 2008, p.345) 399
Cuadro 54. Propiedades a verificar para los agregados 401
Cuadro 55. Propiedades a verificar para el asfalto 401
Cuadro 56. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. 402
Cuadro 57. Cálculo de materiales para elaborar una briqueta Marsall 403
Cuadro 58. Criterio de diseño según EGCC INVÍAS Artículo 450-22 412
Cuadro 59. Granulometría de los materiales 413
Cuadro 60. Gravedad específica de los materiales 414
Cuadro 61. Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall 416
Cuadro 62. Resumen parámetros del diseño Marshall 419
Cuadro 63. Verificación de cumplimiento de la especificación 420
Cuadro 64. Vacíos teóricos de la mezcla 424
Cuadro 65. Vértices y centroide del polígono de vacíos 425
Cuadro 66. Resultados de laboratorio a las briquetas ensayadas 425
Cuadro 67. Tamices de control 426
Cuadro 68. Rangos recomendados para las relaciones de empaquetamiento 428
Cuadro 69. Propiedades de los materiales para conformar la MDC-19 429
Cuadro 70. Dosificación de mezclas asfálticas en caliente por el método Bailey 433
Cuadro 71. Resultado de la dosificación granulométrica por el método Bailey 434
Cuadro 72. Especificación y dosificación para la MDC-19 436
Cuadro 73. Ajuste del modelo Fuller - límite superior de la banda granulométrica 436
Cuadro 74. Valores n/Dmáx para la mezcla MDC-19 437
Cuadro 75. Resultados de la evaluación reológica el cemento asfaltico 60-70 a partir del ensayo con DSR 456
Cuadro 76. Resultados frecuencia reducida y módulo dinámico 459
Cuadro 77. Parámetros de la función sigmoidal mediante minimización de la sumatoria de diferencias al cuadrado de los valores de los módulos 460
Cuadro 78. Criterios de aceptación para capas granulares 462
Cuadro 79. Requisitos de calidad afirmado, subbase y base 463

5 Diseño de pavimentos flexibles 472

Cuadro 1. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes simples y Pt = 2.0 475

Cuadro 2. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem y Pt = 2.0 475
Cuadro 3. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes trídem y Pt = 2.0.....477
Cuadro 4. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes simples y Pt = 2.5 478
Cuadro 5. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem y Pt = 2.5 478
Cuadro 6. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes trídem y Pt = 2.5.....480
Cuadro 7. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes simples y Pt = 3.0 481
Cuadro 8. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem y Pt = 3.0 481
Cuadro 9. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes trídem y Pt = 3.0.....483
Cuadro 10. Nivel de confiabilidad. R (Adaptado de AASHTO, 1993, p. II-9).....486
Cuadro 11. Desviación normal estándar, Z_r (Adaptado de AASHTO, 1993, p. I-62) 486
Cuadro 12. Desviación estándar, S_0 (Adaptado de AASHTO, 1993, p. I-62) 487
Cuadro 13. Índices de serviciabilidad, P_0 y P_t (Adaptado de AASHTO, 1993, p. II-10).....488
Cuadro 14. Valores típicos de coeficiente estructural (Adaptado de INVÍAS., 1998, Cap 8, p. 71)489
Cuadro 15. Coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles, m_i (Adaptado de AASHTO, 1993, p. II-25).....497
Cuadro 16. Coeficientes de drenaje según región climática (INVÍAS, 1998) 499
Cuadro 17. Coeficientes de drenaje según TMI (INVÍAS, 2007, p. 80).....500
Cuadro 18. Espesores mínimos método AASHTO 500
Cuadro 19. Número estructural del modelo.....501
Cuadro 20. Número estructural del pavimento.....504
Cuadro 21. Valores típicos de los módulos de materiales para pavimentos (INVÍAS, 2008).....507
Cuadro 22. Valores típicos de los módulos de materiales para pavimentos (INVÍAS, 2008).....508
Cuadro 23. Valores típicos de los módulos de materiales para pavimentos 511
Cuadro 24. Niveles típicos de confiabilidad del proyecto.....511
Cuadro 25. Función de transferencia, FT 512
Cuadro 26. Funciones de transferencia para el control de ahuellamiento.....515
Cuadro 27. Funciones de transferencia para el control de deflexión.....524
Cuadro 28. Relación porcentual de consumos 526
Cuadro 29. Caracterización del asfalto.....526
Cuadro 30. Tipo de asfalto por emplear en mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (INVÍAS, 2022, Tabla 45-7).....528
Cuadro 31. Verificación estructural.....533

6. Diseño de pavimentos rígidos 537

Cuadro 1. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes simples y Pt = 2.0 (AASHTO, 1993, apendice D) 540
Cuadro 2. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes tándem y Pt = 2.0 (AASHTO, 1993, apendice D).....541
Cuadro 3. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes trídem y Pt = 2.0 (AASHTO, 1993, apendice D) 542
Cuadro 4. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes simples y Pt = 2.5 (AASHTO, 1993, apendice D).....543
Cuadro 5. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes tándem y Pt = 2.5 (AASHTO, 1993, apendice D).....543
Cuadro 6. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes trídem y Pt = 2.5 (AASHTO, 1993, apendice D) 545
Cuadro 7. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes simples y Pt = 3.0 (AASHTO, 1993, apendice D).....546
Cuadro 8. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes tándem y Pt = 3.0 (AASHTO, 1993, apendice D).....546

Cuadro 9. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes trídem y Pt = 3.0 (AASHTO, 1993, apendice D) 547
Cuadro 10. Nivel de confiabilidad, R (Adaptado de AASHTO, 1993, p. II-9) 549
Cuadro 11. Desviación estándar, S_o (Adaptado de AASHTO, 1993, p. I-62) 550
Cuadro 12. Índices de serviciabilidad, P_o y P_t (adaptado de AASHTO, 1993, p. II-10) 551
Cuadro 13. Coeficientes de drenaje para pavimentos rígidos, C_d (Adaptado de AASHTO, 1993, p. II-26) 552
Cuadro 14. Coeficiente de transferencia de carga, J (AASHTO, 1993, p. II-26) 552
Cuadro 15. Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del concreto (Londoño & Alvarez, 2008, p. 83) 553
Cuadro 16. Rangos típicos del factor de pérdida de soporte para varios tipos de materiales (AASHTO, 1993, p. II-27) 553
Cuadro 17. Rangos de valores de K para diferentes tipos de suelo (AASHTO, 1998, Suplemento Parte II) 560
Cuadro 18. Efecto de la subbase granular sobre los valores de K (Londoño & Alvarez, 2008, p. 81) 568
Cuadro 19. Efecto de la subbase tratada con cemento sobre los valores de K (Londoño & Alvarez, 2008, p. 81) 569
Cuadro 20. Cargas máximas de los vehículos comerciales (Elaboración propia a partir de INVÍAS, 2015; Resolución 4100, 2004) 578
Cuadro 21. Configuración de la carga por eje y tipo de vehículo (Elaboración propia a partir de INVÍAS, 2015; Resolución 4100, 2004) 579
Cuadro 22. Distribución de la carga por eje y tipo de vehículo (Elaboración propia a partir de Resolución 4100, 2004) 580
Cuadro 23. Número de ejes del tránsito promedio diario de vehículos comerciales 581
Cuadro 24. Configuración del tránsito de diseño 581
Cuadro 25. Resumen esfuerzos equivalentes por tipo de eje 583
Cuadro 26. Resumen relación de esfuerzos por tipo de eje 583
Cuadro 27. Resumen del factor de erosión por tipo de eje 584
Cuadro 28. Resumen del cálculo del espesor de la losa 585
Cuadro 29. Esfuerzo equivalente pavimento sin berma de concreto hidráulico (eje sencillo y tándem) (PCA, 1984, p. 14) 586
Cuadro 30. Esfuerzo equivalente pavimento con berma de concreto hidráulico (eje sencillo y tándem) (PCA, 1984, p. 14) 587
Cuadro 31. Esfuerzo equivalente pavimento con y sin bermas de concreto hidráulico (eje trídem) (PCA, 1984, p. 20) 589
Cuadro 32. Factor de erosión pavimentos de concreto con dovelas y sin bermas de concreto hidráulico (eje sencillo y tándem) (PCA, 1984, p. 16) 591
Cuadro 33. Factor de erosión pavimentos de concreto sin dovelas y sin bermas de concreto hidráulico (eje sencillo y tándem) (PCA, 1984, p. 16) 593
Cuadro 34. Factor de erosión pavimentos de concreto con dovelas y con bermas de concreto hidráulico (eje sencillo y tándem) (PCA, 1984, p. 18) 595
Cuadro 35. Factor de erosión pavimentos de concreto sin dovelas y con bermas de concreto hidráulico (eje sencillo y tándem) (PCA, 1984, p. 18) 596
Cuadro 36. Factor de erosión pavimentos de concreto con dovelas y con bermas de concreto hidráulico (eje sencillo y tándem) (PCA, 1984, p. 18) 598
Cuadro 37. Factor de erosión pavimentos de concreto con dovelas, sin o con bermas de concreto hidráulico (eje trídem) (PCA, 1984, p. 21) 600
Cuadro 38. Configuración del tránsito de diseño 602
Cuadro 39. Resumen del cálculo del espesor de la losa 608

Cuadro 40. Verificación de esfuerzos y deflexiones....612
Cuadro 41. Requisitos mínimos para las dovelas en las juntas de las losas (Londoño & Alvarez, 2008, p. 96)....614
Cuadro 42. Recomendaciones para las barras de anclaje (Londoño & Alvarez, 2008, p. 95)....615
Cuadro 43. Separación máxima entre juntas....617

7. Diseño de otros tipos de pavimentos....623

Cuadro 1. Equivalencia entre el concreto asfáltico y otros materiales (Sanchez, 2003, p. 32)....625
Cuadro 2. Número estructural del modelo, SN_{DIS}....637
Cuadro 3. Número estructural del pavimento....638
Cuadro 4. Número estructural de las capas granulares con refuerzo debido a los espesores adoptados....639
Cuadro 5. Número estructural del pavimento reforzado....639
Cuadro 6. Número estructural del pavimento....640
Cuadro 7. Número estructural (SN_{TIF})....641
Cuadro 8. Número estructural de las capas granulares con refuerzo debido a la reducción de los espesores....641
Cuadro 9. Número estructural del pavimento....641
Cuadro 10. Verificación estructura inicial....644
Cuadro 11. Verificación estructura inicial....645

Lista de Figuras

1. Generalidades.....29

Figura 1. *Vía Apia*.....*29*
Figura 2. *Sección pavimento flexible (Rincón & Piragauta, 2007)*.....*31*
Figura 3. *Sección pavimento rígido (Rincón & Piragauta, 2007)*.....*33*
Figura 4. *Sección pavimento articulado (Rincón & Piragauta, 2007)*.....*34*
Figura 5. *Ciclo de vida del proyecto*.....*40*
Figura 6. *Factores a considerar en el proceso de diseño de pavimentos (Rincón & Piragauta, 2007)* *45*
Figura 7. *Índice de Thornthwaite*.....*60*
Figura 8. *Curva granulométrica del suelo en estudio*.....*70*
Figura 9. *Respuesta ante la carga de diferentes tipos de pavimentos*.....*79*
Figura 10. *Huella del conjunto de ruedas dobles*.....*81*
Figura 11. *Sistema elástico multicapa generalizado (Yoder & Witczak, 1975)*.....*83*
Figura 12. *Estado de esfuerzos debido a una carga puntual*.....*85*
Figura 13. *Diagrama de esfuerzos para una capa (Yoder & Witczak, 1975)*.....*88*
Figura 14. *Curvas de distribución de esfuerzo vertical en un sistema de dos capas (Yoder & Witczak, 1975)*.....*90*
Figura 15. *Curvas de distribución de esfuerzo vertical en un sistema de dos capas (Yoder & Witczak, 1975)*.....*90*
Figura 16. *Factor F para la teoría de dos capas (Burmister)*.....*91*
Figura 17. *Sistema de pavimento tricapa con localización de los esfuerzos*.....*92*
Figura 18. Modelo estructural.....94
Figura 19. Factores de esfuerzo.....94
Figura 20. Alabeo en una losa de concreto debido a cambios de temperatura.....97
Figura 21. Coeficientes de alabeo (Huang, 2004).....98
Figura 22. Casos de aplicación de carga.....99
Figura 23. Deflexión vertical en la interfase de un sistema bicapa E_1/E_2 = 1 y 5 (Yoder & Witczak, 1975, p. 44).....116
Figura 24. Deflexión vertical en la interfase de un sistema bicapa E_1/E_2 = 10 y 25 (Yoder & Witczak, 1975, p. 45).....116
Figura 25. Deflexión vertical en la interfase de un sistema bicapa E_1/E_2 = 50 y 100 (Yoder & Witczak, 1975, p. 45).....117
Figura 26. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ1$), para K_1 = 0.2 con K_2 = 0.2 y 2 (Yoder & Witczak, 1975, p. 48).....117
Figura 27. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ1$), para K_1 = 0.2 con K_2 = 20 y 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 49).....118
Figura 28. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ1$), para K_1 = 2 con K_2 = 0.2 y 2 (Yoder & Witczak, 1975, p. 50).....118
Figura 29. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ1$), para K_1 = 2 con K_2 = 20 y 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 51).....118
Figura 30. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ1$), para K_1 = 20 con K_2 = 0.2 y 2 (Yoder & Witczak, 1975, p. 52).....119
Figura 31. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ1$), para K_1 = 20 con K_2 = 20 y 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 53).....119
Figura 32. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ1$), para K_1 = 200 con K_2 = 0.2 y 2 (Yoder & Witczak, 1975, p. 54).....119
Figura 33. . Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ1$), para K_1 = 200 con K_2 = 20

y 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 55) 120
Figura 34. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ1$), para K_1 = 20 con K_2 = 20 y 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 53) 120
Figura 35. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ2$), para K_1 = 0.2 con K_2 = 20 y 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 57) 120
Figura 36. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ2$), para K_1 = 2 con K_2 = 0.2 y 2 (Yoder & Witczak, 1975, p. 58) 121
Figura 37. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ2$), para K_1 = 2 con K_2 = 20 y 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 59) 121
Figura 38. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical ($ZZ2$), para K_1 = 20 con K_2 = 0.2 y 2 (Yoder & Witczak, 1975, p. 60) 121
Figura 39. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical (ZZ2), para K_1 = 20 con K_2 = 20 y 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 61) 122
Figura 40. Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical (ZZ2), para K_1 = 200 con K_2 = 0.2 y 2 (Yoder & Witczak, 1975, p. 62) 122
Figura 41. . Factores de esfuerzo tricapa. Esfuerzo vertical (ZZ2), para K_1 = 200 con K_2 = 20 y 200 (Yoder & Witczak, 1975, p. 63) 122

2. EL TRÁNSITO 130

Figura 1. Cálculo del factor de deterioro para el tractocamión 2S3 142
Figura 2. Relación entre el VHP y el TPDA 150
Figura 3. Regresión lineal del TPDS 170

3. LA SUBRASANTE 176

Figura 1. Sondeo en la subrasante 176
Figura 2. Apique en la subrasante 177
Figura 3. Penetrómetro dinámico de cono 178
Figura 4. CBR inalterado 179
Figura 5. CBR de campo (Southern Testing, 2015) 180
Figura 6. Deflectómetro de impacto KUAB 250 181
Figura 7. Deflectómetro de Impacto Liviano - LWD 182
Figura 8. Ensayo de placa (Southern Testing, 2020) 183
Figura 9. Equipo densidad cono y arena 184
Figura 10. Densímetro nuclear 186
Figura 11. Ensayo de humedad 187
Figura 12. Ensayo de granulometría 188
Figura 13. Ensayo de CBR 188
Figura 14. Deformaciones bajo cargas repetidas (Huang, 2004) 189
Figura 15. Ensayo de módulo resiliente 190
Figura 16. Esquema de los límites de Atterberg (Christopher, B. R., Schwartz, C. W., Boudreaux, R., & Berg, 2006) 191
Figura 17. Clasificación de la fracción limo-arcillosa AASHTO 197
Figura 18. Carta de plasticidad SUCS 201
Figura 19. Granulometría del suelo 202
Figura 20. Límites de Atterberg del suelo 203
Figura 21. Proceso de compactación (Gómez, 2019) 205
Figura 22. Diagrama de las fases del suelo 206
Figura 23. Diagrama de las fases del suelo con V_s = 1 208
Figura 24. Principios del proceso de compactación (Gómez, 2019) 210
Figura 25. Efecto de la energía de compactación en la densidad seca (Das & Sobhan,

2018) 211
Figura 26. Tipos de curvas de compactación encontradas en suelos (Das & Sobhan, 2018) 211
Figura 27. Comportamiento típico de la curva de compactación (Das & Sobhan, 2018) 212
Figura 28. Equipo de compactación 214
Figura 29. Patrón de impactos para la compactación 216
Figura 30. Curvas de compactación, relación de vacíos y porosidad 223
Figura 31. Compactador estático de rodillos metálicos lisos 225
Figura 32. Compactador vibratorio de rodillos metálicos lisos 225
Figura 33. Compactador de rodillo pata de cabra 225
Figura 34. Compactador de rodillo en reja 226
Figura 35. Compactador de rodillo de impacto 226
Figura 36. Compactador neumático de llantas 226
Figura 37. Curvas esfuerzo - penetración 238
Figura 38. Ensayo de densidad seca suelta 242
Figura 39. Humedad de equilibrio método Chester McDowell 244
Figura 40. Densidad y humedad de equilibro por la norma INV E-146-13 247
Figura 41. Curvas esfuerzo - penetración 259
Figura 42. Curvas de compactación y densidad contra CBR 260
Figura 43. Resultados ensayo de CBR 262
Figura 44. Humedad de equilibrio método Chester McDowell 265
Figura 45. Curvas para la determinación del CBR en suelos finos 267
Figura 46. Cono reutilizable del PDC 268
Figura 47. Resultados de un ensayo de PDC 270
Figura 48. Resultados de un ensayo con PDC 271
Figura 49. Curva evolución de la penetración 271
Figura 50. Curva diagrama estructural 272
Figura 51. Curva de módulo resiliente 274
Figura 52. Curva de módulo resiliente del suelo ensayado 276
Figura 53. Módulo de superficie 280
Figura 54. Emsamblaje el equipo 281
Figura 55. Altura de caída para la aplicación de la carga 283
Figura 56. Unidades homogéneas mediante el método de diferencias acumuladas 294
Figura 57. Familias de suelos 294
Figura 58. Perfiles de los resultados de los ensayos de la exploración 295
Figura 59. Valores de CBR ordenados de menor a mayor 300
Figura 60. Partes del terraplén 301
Figura 61. Partes del pedraplén 301
Figura 62. Mapa de resistencia con curvas de saturación 315
Figura 61. Curvas de diseño 317

4. Materiales para pavimentos 320

Figura 1. Triángulo de gradación guía en la selección del agente estabilizante 322
Figura 2. Selección del aditivo estabilizante (TM ARMY, 1994b, p 2-2) 324
Figura 3. Mezcla de dos materiales método gráfico 329
Figura 4. Procedimiento de activación herramienta Solver 331
Figura 5. Parámetros de Solver 333
Figura 6. Franja granulométrica 333
Figura 7. Triángulo para representación granulométrica 335

Figura 8. Mezcla de tres materiales método gráfico 337
Figura 9. Segmentos sobre triangulo de representación granulométrica 337
Figura 10. Función MINVERSA (matriz) 339
Figura 11. Función MMULT(matriz1, matriz2) 339
Figura 12. Parámetros de Solver para la mezcla de tres materiales 340
Figura 13. Carta para determinación del contenido inicial de cal 342
Figura 14. Normas de ensayo suelo-cemento 343
Figura 15. Gráfica pérdida de material 349
Figura 16. Densidad estimada de mezclas de suelo-cemento que no contienen material retenido en el tamiz No. 4 - Método A 350
Figura 17. Densidad estimada de mezclas de suelo-cemento que contienen material retenido en el tamiz No. 4 - Método B 351
Figura 18. Contenido de cemento de mezclas de suelo-cemento que no contienen material retenido en el tamiz No. 4 - Método A 351
Figura 19. Contenido de cemento de mezclas de suelo-cemento que contienen material retenido en el tamiz No. 4 - Método B 351
Figura 20. Resistencia mínima a compresión simple a 7 días de mezclas de suelo-cemento que no contienen material retenido en el tamiz No. 4 - Método A 353
Figura 21. Resistencia mínima a compresión simple a 7 días de mezclas de suelo-cemento que contienen material retenido en el tamiz No. 4 - Método B. 353
Figura 22. Densidad aparente máxima 356
Figura 23. Contenido de cemento 356
Figura 24. Curva de compactación mezcla de suelo - cemento 359
Figura 25. Resistencia mínima a compresión simple 360
Figura 26. Etapas y equipos de trituración de agregados pétreos 368
Figura 27. Granulometría del producto de trituradora de quijadas para abertura de salida desde ¾” hasta 4” 374
Figura 28. Granulometría del producto de trituradora de cono modelos 36 “S” y “FC” 376
Figura 29. Diagrama de flujo de la instalación 383
Figura 30. Representación de una curva (punto) y una especificación (ámbito) 384
Figura 31. Cartas de gradación del material de afirmado 386
Figura 32. Cartas de gradación del material de subbase granular 386
Figura 33. Cartas de gradación del material de base granular 387
Figura 34. Cartas de gradación del material de subbase granular 387
Figura 35. Grupos de briquetas a elaborar 402
Figura 36. Parámetros de diseño volumétrico (INV E-799-13) 405
Figura 37. Parámetros volumétricos mezcla asfáltica 408
Figura 38. Curva granulométrica materiales 414
Figura 39. Gráficas del ensayo Marshall 420
Figura 40. Polígono de vacíos 424
Figura 41. Curvas granulométricas de la mezcla MDC-19 435
Figura 42. Curvas granulométricas de la mezcla MDC-19 (punto-ámbito) 438
Figura 43. Ensayo de la viga en tres puntos para el módulo dinámico (Huang, 2004) 441
Figura 44. Modelo Huet-Sayegh (Yao y otros, 2013) 448
Figura 45. Modelo 2S2P1D (Huang, 2015, p. 68) 449
Figura 46. Nomograma para determinar el módulo de asfaltos convencionales 451
Figura 47. Carta RT 452
Figura 48. Carta para determinar IP y T_{800} 452

Figura 49. Nomograma para estimar el módulo de la mezcla asfáltica..... 453
Figura 50. Superposición frecuencia – temperatura, curva maestra a partir del desplazamiento de curvas isotérmicas..... 454
Figura 51. Curva de susceptibilidad térmica para el cemento asfáltico..... 457
Figura 52. Curvas isotérmicas del módulo dinámico..... 460
Figura 53. Curva maestra de la mezcla asfáltica en caliente MDC 25..... 461
Figura 54. Estados de los materiales..... 463
Figura 55. Separación de las descargas de las volquetas para el acordonado..... 464
Figura 56. Curva de compactación P.M. para un material de base granular..... 465
Figura 57. Espesor de la capa de base granular en estado suelto para la compactación..... 466
Figura 58. Tasa de aplicación de agua para la compactación, R..... 467
Figura 59. Carrotanque irrigador de agua..... 468

5 Diseño de pavimentos flexibles 472

Figura 1. Cálculo del factor de deterioro para el camión 2S3..... 484
Figura 2. Variación del coeficiente estructural de la capa de subbase granular (Adaptado de AASHTO, 1993, p. II-21)..... 491
Figura 3. Variación del coeficiente estructural de la capa base granular (Adaptado de AASHTO, 1993, p. II-19)..... 492
Figura 4. Variación del coeficiente estructural de la capa tratada con cemento (Adaptado de AASHTO, 1993, p. II-23)..... 493
Figura 5. Variación del coeficiente estructural de la capa tratada con asfalto (Adaptado de AASHTO, 1993, p. II-24)..... 494
Figura 6. Coeficiente estructural del concreto asfáltico en función del módulo resiliente (Adaptado de AASHTO, 1993, p. II-18)..... 495
Figura 7. Coeficiente estructural del concreto asfáltico en función de otros parámetros (Adaptado de AASHTO, 1993, p. II-21)..... 496
Figura 8. Sección transversal de drenaje la capa granular de pavimento..... 497
Figura 9. Configuración del eje estándar (Rincón & Piragauta, 2007, p. 34)..... 505
Figura 10. Modelo estructural del pavimento..... 509
Figura 11. Agrietamiento por fatiga..... 510
Figura 12. Ahuellamiento por deformación permanente..... 515
Figura 13. Modelo estructural..... 520
Figura 14. Programa BISAR 3.0 para modelación de estructuras de pavimento (Shell International Petroleum Company Limited, 1998)..... 525
Figura 15. Formato SBIT para el cálculo de la rigidez del asfalto (Shell International Petroleum Company Limited, 1998)..... 530
Figura 16. Modelo estructural del ejemplo..... 531
Figura 17. Reporte BISAR 3.0 – Solicitaciones en servicio..... 533

6. Diseño de pavimentos rígidos 537

Figura 1. Cálculo del factor de deterioro para el tractocamión 2S3..... 549
Figura 2. Esquema ensayo módulo de rotura con carga en los tercios medios (INVÍAS, 2013, INV E-414-13 p.3)..... 551
Figura 3. Esquema ensayo módulo de rotura con carga en el punto medio (INVÍAS, 2013, INV E-414-13 p.3)..... 551
Figura 4. Esquema del ensayo de placa (Londoño & Alvarez, 2008, p. 76)..... 554
Figura 5. Módulo de reacción en función del CBR..... 555
Figura 6. Carta para estimar el módulo de reacción compuesto asumiendo una profundidad semi-infinita de la capa de soporte (AASHTO, 1993, p. II-39)..... 556
Figura 7. Carta para modificar el módulo de reacción de la subrasante por la presencia de una capa

rígida (estrato rocoso) cercana a la superficie (AASHTO, 1993, p. II-40) 557
Figura 8. Carta para estimar el daño relativo (U_R) en pavimentos rígidos (AASHTO, 1993, p. II-41) 559
Figura 9. Carta para corregir el módulo de reacción de la subrasante efectivo por potencial pérdida de soporte de la subbase (AASHTO, 1993, p. II-42) 560
Figura 10. Módulo de reacción de la subrasante, Ks 563
Figura 11. Módulo de reacción compuesto de la subrasante, Kc 563
Figura 12. Módulo de reacción de la subrasante corregido, K_{cc} 564
Figura 13. Módulo de reacción promedio compuesto corregido, K_{cc} 565
Figura 14. Módulo de reacción de la subrasante efectivo, K 565
Figura 15. Fatiga: esfuerzo crítico 566
Figura 16. Erosión: deflexión crítica 567
Figura 17. Proporción de camiones en el carril derecho de una carretera multicarril con separador (Portland Cement Association. [PCA], 1984, p. 9) 571
Figura 18. Configuración del eje de carga 573
Figura 19. Reporte de cálculo del ejemplo con programa BS-PCA 585
Figura 20. Análisis de fatiga. Repeticiones admisibles en función de la relación de esfuerzos en pavimentos con y sin berma de concreto hidráulico (PCA, 1984, p. 15) 589
Figura 21. Análisis de erosión, sin bermas de concreto. Repeticiones admisibles en función del factor de erosión en pavimentos sin bermas de concreto hidráulico (PCA, 1984, p. 17) 594
Figura 22. Análisis de erosión, con bermas de concreto. Repeticiones admisibles en función del factor de erosión en pavimentos con bermas de concreto hidráulico (PCA, 1984, p. 19) 598
Figura 23. Reporte de cálculo del ejemplo con programa PCAcálculo 608
Figura 24. Esquema de esfuerzos totales 613
Figura 25. Esquema de la estructura diseñada 613
Figura 28. Juntas de expansión (FHWA, 2019, p. 5) 618
Figura 29. Detalle sello de junta (Euclid Group Toxement, 2019, p. 7) 619
Figura 30. Transición entre pavimento flexible y rígido (Adaptado de Sabogal, n.d.) 619
Figura 31. Estructura de pavimento rígido diseñada 620

7. Diseño de otros tipos de pavimentos 623

Figura 1. Estructuras de pavimento posibles a implementar 628
Figura 2. Ábaco de diseño de espesores de pavimento en material granular 632
EE8.2t/CD/PD, $N_{8\cdot2t_DIS}$ 637
Figura 3. Relación del coeficiente de capa (Tenax, 2006, p. 25) 638
Figura 4. Diseño AASHTO 1993 – LCR, estructura sin y con refuerzo 639
Figura 5. Factor de mejoramiento del tránsito (TIF) (Tenax, 2006, p. 23) 640
EE8.2t/CD/PD, $N_{8\cdot2t_DIS}$ 641
Figura 6. Diseño AASHTO 1993 – TIF, estructura sin y con refuerzo 642
Figura 7. Diseño AASHTO 1993 – TIF, estructura sin y con refuerzo 643
Figura 8. Reporte BISAR 3.0 – Solicitaciones en servicio del modelo final 645
Figura 9. Diseño mecanicista estructura sin y con refuerzo 645

Anexos

Anexo A. Funciones A – H para ecuaciones de Ahlvin y Ulery..... 92
Anexo B. Diagrama de Burmister para factores F.....100
Anexo C. Ábacos de Pettie para factores esfuerzo..... 101
Anexo D. Tablas de Jones para factores esfuerzo.....107

UNIDADES DE MEDIDA

Algunas unidades de medida utilizadas en diseño de pavimentos se definen como se indica en el siguiente cuadro.

Símbolo	Denominación	Símbolo	Denominación
°C	grado Celsius (centígrado)	m	metro
°F	grado Fahrenheit	m^2	metro cuadrado
cm	centímetro	m^3	metro cúbico
cm^2	centímetro cuadrado	mg	miligramo
cm^3	centímetro cúbico	mils	milésimas de pulgada
cP	centipoise	mm	milímetro
h	hora	min	minuto
s	segundo	Pa	pascal
Hz	hercio	MPa	megapascal
MHz	megahercios	MPa/m	megapascal por metro
gr	gramo	N	newton
kg	kilogramo masa	N/m^2	newton por metro cuadrado
kg/cm^2	kilogramo por centímetro cuadrado	kN/m^3	kilonewton por metro cúbico
gr/cm^3	gramo por centímetro cúbico	N-m/°	Newton por metro por grado
km	kilómetro	pulg, ”	pulgada
km/h	kilómetro por hora	$pulg^2$	pulgada cuadrada
kN	kilonewton	’	pie
kPa	kilopascal	t	tonelada
lb	libra	HP	caballos de fuerza
$lb/pulg^2$	libras por pulgada cuadrada	strain	deformaciones
$lb/pulg^3$	libras por pulgada cúbica	µstrain	microdeformaciones
lb/pie^3	libras por pie cúbico	µm	micrómetro
kips	kilolibras	%1	tanto por uno
veh mix/ día	vehículos mixtos día	Veq/h-carril	vehículos equivalentes hora carril

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AASHO: American *Association of State Highway Officials* (Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras)
AASHTO: American *Association of State Highway and Transportation Officials* (Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte)
ASTM: *American Society for Testing Materials* (Sociedad Americana de Ensayos y Materiales)
Austroads: Agencias de transporte de Australia y Nueva Zelanda
BISAR: *Bitumen Stress Analysis in Roads*
CBR: *California Bearing Ratio* (Relación de Soporte de California)
DN: Índice de Penetración
DSR: *Dinamyc Shear Rheometer* (Reómetro de Corte Dinámico)
DT: *Destructive Testing* (Pruebas Destructivas)
EE8.2t/CD/PD: Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño
EGCC: Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras
ESAL: *Equivalent Single Axle Loads* (cargas del eje simple equivalente)
Famb: Factor ambiental
FHWA: *Federal Highway Administration* (Administration Federal de Carreteras)
FWD: *Falling Weigth Deflectometer* (Deflectómetro de Impacto)
hm: Succión matricial
ICPC: Instituto Colombiano de Productores de Cemento
IG: Índice de Grupo
INV: Instituto Nacional de Vías de Colombia
INVÍAS: Instituto Nacional de Vías de Colombia
IP: Índice Plástico
K: Módulo de reacción, coeficiente de balasto o módulo de Westergaard
LCPC: *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (Laboratorio Central de Puentes y Carreteras)
LL: Límite Líquido
LP: Límite Plástico
LWD: *Light Weight Deflectometer* (Deflectómetro de Impacto Liviano)
MEPDG: *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (Guía de Diseño Mecanístico Empírico de Pavimentos)
Mr: Módulo resiliente
NCHRP: *National Cooperative Highway Research Program* (Programa Nacional Cooperativo de Investigación Vial)
NDT: *Non Destructive Testing* (Pruebas no Destructivas)
NTC: Norma Técnica Colombiana
PDC: Penetrómetro Dinámico de Cono
PMA: Precipitación media anual
PSI: *Present Serviceability Index* (Índice de Serviciabilidad Presente)
RAMCODES: *Rational Methodology for Compacted Geomaterials Density and Strength Analysis* (Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados)
SHRP: *Strategic Highway Research Program* (Programa Estratégico de Investigación de carreteras)

SN: *Structural Number* (Número Estructural)
SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
SWCC: *Soil-Water Characteristic Curve* (Curva característica del suelo)
TMAP: Temperatura media anual promedio del aire
TMI: *Thornthwaite Moisture Index* (índice de Thornthwaite)
TPD: Tránsito Promedio Diario
TRRL: *Transport and Road Research Laboratory* (Laboratorio de Investigación en Transporte y Carreteras)
wPI: Producto entre pasa tamiz 200 y el índice de plasticidad