



EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

**Edwin Antonio
Guzmán Suárez**

Evaluación estructural de pavimentos flexibles/ Guzmán Suárez Edwin Antonio. Tunja-Boyacá: Editorial Fundación Universitaria Juan de Castellanos, 2023. p 329.

Primera Edición 2023

Libro de Investigación

ISBN Digital: 978-958-8966-55-7

DOI: <https://doi.org/10.38017/9789588966557>

1. Pavimentos 2. Evaluación estructural 3. Deflectómetro de impacto 4. Cuenco de deflexiones
5. Retrocálculo (Dewey 610) (THEMA M Medicina, Enfermería y Veterinaria)

Dewey: 625.7

Thema: T – Tecnología, ingeniería, agricultura, procesos industriales

DIRECTIVOS FUNDACIÓN UNIVERSITARIA JUAN DE CASTELLANOS

Rector

Pbro. Luis Enrique Pérez Ojeda

Vicerrector académico

Pbro. Oswaldo Martínez Mendoza, Ph.D.

Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

Jhon Alexander Bohada Jaime Ph. D.

Director Ingeniería Civil

Mg. Carlos Andrés Reyes Rodríguez



Editorial: Fundación Universitaria Juan de Castellanos

Editora: Mg. Sandra Liliana Acuña González

Edificio Álvaro Castillo: Carrera 11 N° 11 – 44 Tunja – Boyacá

editor@jdc.edu.co

www.jdc.edu.co

Revisión de estilo

Mg. Alfredo de Jesús Mendoza Escalante

Diseño de carátula y diagramación

Editorial JOTAMAR S.A.S.

Calle 57 No. 3 - 39. Tunja - Boyacá - Colombia

CONTENIDO

1.	EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.....	23
1.1	Generalidades.....	23
1.2	Métodos de evaluación estructural.....	25
1.2.1	Evaluación estructural no destructiva (Nondestructive testing - NDT).....	25
1.2.1.1	Equipos para la medición de deflexiones bajo carga estática con movimiento lento.....	26
1.2.1.2	Equipos para la medición de deflexiones bajo carga dinámica estable.....	27
1.2.1.3	Equipos para la medición de deflexiones bajo carga de impacto.....	28
1.2.1.4	Medición continua de deflexiones bajo carga rodante.....	29
1.2.2	Evaluación estructural destructiva (Destructive testing - DT).....	30
2.	MÉTODOS DESTRUCTIVOS.....	31
2.1	Exploración geotécnica.....	31
2.1.1	Programa de ensayos.....	32
2.1.2	Profundidad de influencia.....	34
2.1.3	Recuperación de muestras.....	35
2.1.4	Inspección visual de las muestras.....	37
2.1.5	Número requerido de ensayos.....	38
2.1.6	Ensayos de campo.....	38
2.1.6.1	Penetrómetro Dinámico de Cono (INV E-172-13).....	39
2.1.6.2	CBR con muestras inalteradas (INV E-148-13).....	41
2.1.6.3	Deflectómetro de Impacto Liviano - LWD.....	42
2.1.6.4	Densidad.....	44

2.2	Caracterización de materiales en laboratorio.....	48
2.2.1	Propiedades índices.....	48
2.2.1.1	Contenido de humedad (INV E-122-13).....	49
2.2.1.2	Determinación del tamaño de las partículas (INV E-123-13).....	50
2.2.1.3	Índices de consistencia.....	51
2.2.2	Propiedades mecánicas.....	52
2.2.2.1	Relación de Soporte de California - CBR (INV E-148-13).....	53
2.2.2.2	Módulo resiliente (INV E-156-13).....	54
2.2.3	Módulo resiliente en suelos de grano fino de subrasante.....	57
2.2.3.1	Características del ensayo en suelos de grado fino.....	57
2.2.3.2	Modelos constitutivos.....	58
2.2.3.3	Factores que influyen en el módulo resiliente.....	59
2.2.3.4	Módulo resiliente en servicio.....	61
2.2.4	Módulo resiliente en suelos granulares no ligados de subbase y base.....	64
2.2.4.1	Características del ensayo en suelos granulares.....	64
2.2.4.2	Modelos constitutivos.....	65
2.2.4.3	Factores que influyen en el módulo resiliente.....	68
2.2.5	Módulo en mezclas de concreto asfáltico.....	69
2.2.5.1	Módulo resiliente.....	69
2.2.5.2	Módulo dinámico complejo.....	71
2.2.5.3	Módulo dinámico de rigidez.....	73
2.3	Caracterización de la resistencia mediante correlaciones...	75
2.3.1	Caracterización de la subrasante.....	76
2.3.2	Caracterización de materiales granulares no ligados de subbase y base.....	83
2.3.3	Caracterización de la mezcla de concreto asfáltico.....	87
3.	MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS.....	99
3.1	Auscultación de deterioros.....	99
3.1.1	Métodos de clasificación y cuantificación de los deterioros.....	103

3.1.1.1	Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles del INVÍAS.....	103
3.1.1.2	Metodología VIZIR: Visión Inspección de Zonas e Itinerarios en Riesgo (Visión Inspection de Zones Et Itinéraires Á Risque).....	105
3.1.2	Metodología PCI: Índice de Condición del Pavimento (Pavement Condition Index).....	114
3.1.3	Metodología PAVER.....	120
3.2	Deflexiones en pavimentos.....	126
3.2.1	Factores que afectan la magnitud de las deflexiones.....	131
3.2.1.1	Características del pavimento.....	131
3.2.1.2	Características de la carga.....	132
3.2.1.3	Condiciones climáticas.....	133
3.2.2	Viga Benkelman.....	134
3.2.3	Deflectómetro de Impacto - FWD.....	135
3.2.4	Rolling Wheel Deflectometer - RWD.....	136
3.2.5	Deflectómetro de Impacto Liviano - LWD.....	137
3.3	Georadar.....	138
3.4	Geogauge.....	139
4.	DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO.....	141
4.1	Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer - FWD).....	141
4.2	Procedimiento de mediciones.....	143
4.3	Análisis de deflexiones en crudo.....	146
4.4	Normalización o corrección de deflexiones.....	147
4.4.1	Corrección de deflexiones por carga.....	148
4.4.2	Corrección de deflexiones por temperatura.....	148
4.4.2.1	Expresiones para estimar la temperatura media de la capa asfáltica.....	149
4.4.2.2	Corrección por temperatura para la deflexión en el punto de aplicación de la carga.....	153

4.4.2.3	Corrección por temperatura para las deflexiones alejadas del punto de aplicación de la carga.....	158
---------	---	-----

4.5	Definición de secciones homogéneas.....	160
-----	--	-----

4.6	Cuencos característicos.....	161
-----	-------------------------------------	-----

5. PARÁMETROS DEL CUENCO DE DEFLEXIONES.....167

5.1	Evaluación cualitativa del pavimento.....	167
-----	--	-----

5.1.1	Índices Deflexión Central (D_0), Índice de Curvatura Superficial (ICS), Índice de Daño de la Base (IDB) e Índice de Curvatura de la Base (ICB).....	168
-------	---	-----

5.1.2	Radio de curvatura.....	171
-------	-------------------------	-----

5.1.3	Parámetro ÁREA.....	171
-------	---------------------	-----

5.1.4	Relación de área normalizada.....	174
-------	-----------------------------------	-----

5.1.5	Área bajo el perfil del pavimento.....	176
-------	--	-----

5.1.6	Factores de forma.....	177
-------	------------------------	-----

5.1.7	Índice estructural.....	178
-------	-------------------------	-----

5.1.8	Factor de extensibilidad.....	179
-------	-------------------------------	-----

5.1.9	Índices de área.....	180
-------	----------------------	-----

5.1.10	Factor de curvatura.....	181
--------	--------------------------	-----

5.1.11	Pendiente de la deflexión.....	182
--------	--------------------------------	-----

5.1.12	Relación de deflexión (Deflection Ratio - DR).....	182
--------	--	-----

5.1.13	Índice de extensibilidad de la carga (Load Spreadability Index - LSI).....	183
--------	--	-----

6. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE MÓDULOS.....185

6.1	Módulos mediante retrocálculo.....	185
-----	---	-----

6.1.1	Programas de retrocálculo.....	185
-------	--------------------------------	-----

6.1.2	Proceso de retrocálculo.....	189
-------	------------------------------	-----

6.1.3	Aseguramiento de la calidad.....	191
-------	----------------------------------	-----

6.1.3.1	Módulo de superficie.....	191
---------	---------------------------	-----

6.1.3.2	Rango de módulos y valor inicial.....	194
---------	---------------------------------------	-----

6.1.4	Estimación de la profundidad de la capa rígida.....	197
-------	---	-----

6.1.4.1	Método de Rohde y Scullion.....	198
---------	---------------------------------	-----

6.1.4.2	Método de Chatti y Harichandran.....	201
---------	--------------------------------------	-----

6.1.5	Factores de ajuste para los módulos de retrocálculo.....	202
6.1.5.1	Subrasante.....	203
6.1.5.2	Granulares no ligados de subbase y base.....	210
6.1.5.3	Mezcla de concreto asfáltico.....	212
6.2	Módulos mediante cálculo directo y ecuaciones de correlación.....	215
6.2.1	Subrasante.....	215
6.2.1.1	Resistencia de la subrasante caracterizada a partir del módulo resiliente.....	215
6.2.1.2	Resistencia de la subrasante caracterizada a partir del CBR.....	231
6.2.2	Granulares no ligados de subbase y base.....	232
6.2.3	Mezcla de concreto asfáltico.....	232
7.	MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL.....	237
7.1	Evaluación estructural del pavimento con base en ensayos NDT y DT.....	239
7.2	Evaluación estructural del pavimento con base en ensayos NDT.....	246
7.3	Evaluación estructural del sistema pavimento-subrasante.....	251
8.	MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE ESTADOS TENSIONALES.....	255
8.1	Modelos de deterioro.....	255
8.1.1	Modelo de agrietamiento por fatiga.....	256
8.1.1.1	Estados tensionales en servicio.....	257
8.1.1.2	Estados tensionales admisibles-funciones de transferencia.....	258
8.1.2	Modelo de ahuellamiento por deformación permanente.....	262
8.1.2.1	Estados tensionales en servicio.....	263

8.1.2.2	Estados tensionales admisibles-funciones de transferencia.....	263
---------	--	-----

9. ÍNDICES DE CONDICIÓN ESTRUCTURAL.....267

9.1	Índice de resistencia estructural, SSI.....	267
9.2	Índice de condición estructural, SCI.....	268
9.3	Índice estructural modificado, MSI.....	269
9.4	Factor de condición, CF.....	270
9.5	Vida remanente, VR.....	270

10. APLICACIONES DE LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL.....273

10.1	Gestión de pavimentos.....	274
10.1.1	Evaluación estructural en la gestión de pavimentos a nivel de red.....	275
10.1.2	Evaluación estructural en la gestión de pavimentos a nivel de proyecto.....	277

11. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....279

11.1	Definición de secciones homogéneas.....	280
11.2	Cuenco característico.....	282
11.2.1	Corrección de deflexiones.....	282
11.2.1.1	Corrección por carga.....	283
11.2.1.2	Corrección por temperatura.....	283
11.2.2	Cuenco característico.....	285
11.3	Evaluación estructural cualitativa.....	287
11.3.1	Índices D_0 , ICS, IDB e ICB.....	288
11.3.2	Parámetros ÁREA, A_{upp} y área normalizada.....	289
11.3.3	Índice de condición estructural.....	290
11.3.4	Factor de extensibilidad.....	291
11.3.5	Índice de extensibilidad de la carga.....	292

11.4	Evaluación estructural cuantitativa.....	292
11.4.1	Retrocálculo.....	293
11.4.1.1	Módulo de superficie.....	293
11.4.1.2	Profundidad de la capa rígida.....	295
11.4.2	Cálculo directo.....	296
11.4.2.1	Capa de subrasante.....	297
11.4.2.2	Capa de material granular.....	297
11.4.2.3	Capa de concreto asfáltico.....	298
11.4.3	EVERCALC.....	300
11.4.3.1	Factores de ajuste para los módulos de retrocálculo.....	304
11.4.4	Capacidad estructural del pavimento.....	306
11.4.5	Estados tensionales.....	310
11.4.5.1	Agrietamiento por fatiga.....	310
11.4.5.2	Ahuellamiento por deformación permanente.....	311
11.5	Índices de condición estructural.....	312
11.6	Vida remanente, VR.....	314
11.7	Módulo resiliente en servicio.....	314
11.8	Modelo de comportamiento.....	319
12.	REFERENCIAS.....	321

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1	Ensayos de laboratorio para un proyecto de rehabilitación.....	33
Cuadro 2	Valores típicos de K1 para capas de base y subbase.....	85
Cuadro 3	Clasificación de los tipos de daño de acuerdo con el manual del INVÍAS.....	104
Cuadro 4	Clasificación de los deterioros - VIZIR.....	106
Cuadro 5	Niveles de gravedad de los daños tipo A.....	108
Cuadro 6	Niveles de gravedad de los daños tipo B.....	109
Cuadro 7	Rangos de clasificación VIZIR.....	113
Cuadro 8	Rangos de calificación del PCI.....	114
Cuadro 9	Longitud de unidades de muestreo para calzadas asfálticas.....	115
Cuadro 10	Formato para la obtención del máximo valor deducido corregido.....	118
Cuadro 11	Tipos de deterioros método PCI.....	120
Cuadro 12	Tipos de deterioros PAVER.....	122
Cuadro 13	Intervalo de MDR y tipo de condición para cada uno de los rangos.....	124
Cuadro 14	Rangos de clasificación del OPI.....	126
Cuadro 15	Coeficientes de las ecuaciones BELLS2 y BELLS3.....	152
Cuadro 16	Solución tabulada de la aproximación sucesiva de las diferencias acumuladas.....	160
Cuadro 17	Deflexión característica en función de la extensión de pavimento con $D > D_c$	163
Cuadro 18	Valores recomendados para f en función del tipo de vía.....	164
Cuadro 19	Valores recomendados para f en función del número de deflexiones.....	164
Cuadro 20	Parámetros empleados para la evaluación deflectométrica cualitativa.....	170

Cuadro 21	Umbral de evaluación deflectométrica cualitativa.....	170
Cuadro 22	Rangos del parámetro ÁREA según la estructura del pavimento.....	173
Cuadro 23	Capacidad estructural del pavimento con base en la relación de área normalizada.....	175
Cuadro 24	Condición estructural.....	179
Cuadro 25	Condición estructural mediante el factor de extensibilidad.....	180
Cuadro 26	Condición estructural mediante el parámetro DR.....	183
Cuadro 27	Valores típicos de módulo para materiales de subrasante.....	195
Cuadro 28	Valores típicos de módulo para capas de material sin estabilizar.....	195
Cuadro 29	Valores típicos de módulo para capas de material estabilizado.....	196
Cuadro 30	Valores típicos del coeficiente de Poisson.....	197
Cuadro 31	Factor de ajuste para suelos de subrasante.....	204
Cuadro 32	Factor de ajuste para suelos de subrasante fino-granulares.....	206
Cuadro 33	Factor de ajuste empleado por agencias de transporte en Estados Unidos.....	207
Cuadro 34	Factor de ajuste para suelos de subrasante de acuerdo al tipo de suelo.....	207
Cuadro 35	Factor de ajuste para capas de base o subbase granular.....	212
Cuadro 36	Factor de ajuste con temperatura de referencia prefijada.....	213
Cuadro 37	Factor de ajuste con temperatura de referencia seleccionable.....	214
Cuadro 38	Coeficientes para la relación M_{tr} – SIS.....	219
Cuadro 39	Coeficientes para el modelo de Hogg.....	228
Cuadro 40	Coeficientes de ajuste de curvas para la determinación de I_0 y M_{tr}	230
Cuadro 41	Coeficientes estructurales de pavimentos asfálticos en servicio.....	239
Cuadro 42	Coeficientes estructurales y módulos de los materiales patrón de la prueba vial AASHO.....	240

Cuadro 43	Coeficientes para la relación SN - SIP.....	244
Cuadro 44	Coeficientes para el método de Asgari.....	251
Cuadro 45	Funciones de transferencia para el control de agrietamiento.....	259
Cuadro 46	Niveles típicos de confiabilidad del proyecto.....	260
Cuadro 47	Función de transferencia, FT.....	261
Cuadro 48	Funciones de transferencia para el control de ahuellamiento.....	264
Cuadro 49	Coeficientes del modelo para pavimentos flexibles.....	268
Cuadro 50	Información deflectométrica.....	279
Cuadro 51	Secciones homogéneas mediante el método de diferencias acumuladas.....	280
Cuadro 52	Secciones homogéneas definidas.....	282
Cuadro 53	Deflexiones corregidas sección homogénea 2.....	285
Cuadro 54	Variables estadísticas.....	286
Cuadro 55	Cuenco característico sección homogénea 2.....	286
Cuadro 56	Evaluación deflectométrica cualitativa índices Horak....	288
Cuadro 57	Parámetros para el cálculo del índice estructural.....	290
Cuadro 58	Factor F.....	292
Cuadro 59	Valores del módulo de superficie.....	294
Cuadro 60	Características del pavimento modelo.....	315

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de funcionamiento del deflectómetro de impacto.....	29
Figura 2	Sondeo en estructuras de pavimento.....	36
Figura 3	Apique en estructuras de pavimento.....	37
Figura 4	Penetrómetro Dinámico de Cono - PDC.....	39
Figura 5	Resultados de un ensayo de PDC.....	40
Figura 6	CBRinalterado.....	42
Figura 7	Deflectómetro de Impacto Liviano - LWD.....	43
Figura 8	Equipo densidad cono y arena.....	45
Figura 9	Densímetro nuclear.....	48
Figura 10	Ensayo de humedad.....	49
Figura 11	Ensayo de granulometría.....	51
Figura 12	Ensayo de límite líquido.....	52
Figura 13	Ensayo de CBR.....	54
Figura 14	Deformaciones bajo cargas repetidas.....	55
Figura 15	Ensayo de módulo resiliente.....	56
Figura 16	Curva de módulo resiliente.....	59
Figura 17	Ensayo de la viga en tres puntos para el módulo dinámico.....	74
Figura 18	Modelo Huet-Sayegh.....	95
Figura 19	Modelo 2S2P1D.....	97
Figura 20	Inspección de deterioros en el pavimento - manual.....	100
Figura 21	Inspección de deterioros en el pavimento - asistida por imágenes.....	101
Figura 22	Determinación del Índice de Deterioro Superficial “I _s ”.....	112
Figura 23	Ejemplo de uso curva PAVER.....	122
Figura 24	Curvas PAVER.....	125
Figura 25	Cuenco de deflexión.....	127

Figura 26	Significado cualitativo de los tipos de cuencos de deflexión.....	128
Figura 27	Pulsos típicos del FWD y su correspondiente cuenco de deflexiones.....	130
Figura 28	Viga Benkelman.....	134
Figura 29	Modelos de deflectómetros de impacto - FWD.....	136
Figura 30	Deflectómetro continuo rodante - RWD.....	137
Figura 31	Modelos de deflectómetros de impacto liviano - LWD.....	138
Figura 32	Georadar - GPR.....	139
Figura 33	Geogauge.....	140
Figura 34	Deflectómetro de impacto KUAB 250.....	143
Figura 35	Medición deflectométrica en pavimentos flexibles.....	145
Figura 36	Reporte deflectómetro de impacto KUAB.....	147
Figura 37	Zonas del cuenco de deflexión.....	169
Figura 38	Parámetro ÁREA.....	172
Figura 39	Área bajo el perfil del pavimento.....	177
Figura 40	Elementos comunes en los programas de retrocálculo.....	189
Figura 41	Gráficas típicas del módulo de superficie.....	193
Figura 42	Deflexión cero debido a una capa rígida.....	199
Figura 43	Gráfica 1/r vs deflexión medida.....	199
Figura 44	Periodo natural - T_d , a partir del historial de tiempo del sensor de deflexión.....	202
Figura 45	Factor de ajuste terraplén granular sobre subrasante de suelo fino.....	209
Figura 46	Factor de ajuste terraplén de suelo fino sobre subrasante granular.....	209
Figura 47	Distribución de esfuerzo y medida del cuenco de deflexión bajo la carga del FWD.....	218
Figura 48	Geometría del modelo de Hogg.....	224
Figura 49	Agrietamiento por fatiga.....	257
Figura 50	Ahuellamiento por deformación permanente.....	262
Figura 51	Aplicaciones de la evaluación estructural de pavimentos flexibles.....	273
Figura 52	Actividades en un sistema de gestión de pavimentos.....	275

Figura 53	Secciones homogéneas mediante el método de diferencias acumuladas.....	282
Figura 54	Cuenca de deflexión calculado.....	291
Figura 55	Gráficas del módulo de superficie.....	294
Figura 56	Gráfica deflexión medida contra inverso de la distancia radial.....	295
Figura 57	Ventana datos generales EVERCALC.....	302
Figura 58	Ventana datos de deflexión EVERCALC.....	303
Figura 59	Reporte de resultados EVERCALC.....	304
Figura 60	Reporte de resultados EVERCALC deflexiones sin corregir por temperatura.....	305
Figura 61	Curva de módulo resiliente.....	319
Figura 62	Modelo de comportamiento del IRI.....	320

UNIDADES DE MEDIDA

Algunas unidades de medida utilizadas en la evaluación estructural de pavimentos flexibles 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
cSt	centistoke	min	minuto
G	gramo	MPa	megapascal
H	hora	MHz	megahercios
Hz	hercio	N	newton
kg	kilogramo masa	N/m ²	newton por metro cuadrado
kg/cm ²	kilogramo por centímetro cuadrado	P	poise
kg/m ³	kilogramo por metro cúbico	Pa	pascal
kgf	kilogramo fuerza	Pa-s	pascal-segundo
km	kilómetro	pulg	pulgada
km/h	kilómetro por hora	pulg ²	pulgada cuadrada
kN	kilonewton	rad	radianes
kPa	kilopascal	s	segundo
klb/pulg ²	kilolibras por pulgada cuadrada	strain	deformaciones
klb/pie ²	kilolibras por pie cuadrado	sSF	segundo Saybol Furol
klb-pulg	kilolibras por pulgada	St	stoke
lb-pulg ^{1/3}	libras por pulgada elevada a la 1/3	t	tonelada
lb	libra	u	unidad
lb/pulg ²	libras por pulgada cuadrada	µm	micrómetro
lb/pie ³	libras por pie cúbico	µstrain	microdeformaciones
“	pulgada	°	grado



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)
ALDOT:	Alabama Department of Transportation (Departamento de Transporte de Alabama)
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)
CSIR:	South African Council on Scientific and Industrial Research (Concilio Sur Africano de Investigaciones Científicas e Industriales)
DN:	Índice de Penetración
DSR:	Dinamyc Shear Rheometer (Reómetro de Corte Dinámico)
DT:	Destructive Testing (Pruebas Destructivas)
dTIMS:	Deighton Total Infrastructure Management System (Sistema de Gestión de Infraestructura Total Deighton)
ENTPE:	École Nationale des Travaux Publics de l'État (Escuela Nacional de Trabajos Públicos del Estado)
FHWA:	Federal Highway Administration (Administration Federal de Carreteras)
FWD:	Falling Weight Deflectometer (Deflectómetro de Impacto)
GPR:	Ground Penetrating Radar (Georadar)
IG:	Índice de Grupo

INDOT:	Indiana Department of Transportation (Departamento de Transporte de Indiana)
IP:	Índice Plástico
INV:	Instituto Nacional de Vías de Colombia
INVÍAS:	Instituto Nacional de Vías de Colombia
IRC:	Indian Road Congress (Congreso de Carreteras de la India)
LCPC:	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Laboratorio Central de Puentes y Carreteras)
LL:	Límite Líquido
LP:	Límite Plástico
LTPP:	Long Term Pavement Performance (Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo)
LWD:	Light Weight Deflectometer (Deflectómetro de Impacto Liviano)
MEPDG:	Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (Guía de Diseño Mecanístico Empírico de Pavimentos)
MDR:	Modified Distress Rating (Índice de Daños Superficiales)
MOPT:	Ministerio de Obras Públicas y Transporte
Mr:	Módulo resiliente
NCHRP:	National Cooperative Highway Research Program (Programa Nacional Cooperativo de Investigación Vial)
NDT:	Non Destructive Testing (Pruebas no Destructivas)
OPI:	Overall Pavement Index (Índice de Condición Global del Pavimento)
PAVER:	Pavement Maintenance Management System
PDC:	Penetrómetro Dinámico de Cono
PCI:	Pavement Condition Index (Índice de Condición del Pavimento)
PITRA:	Programa de Infraestructura del Transporte
PMS:	Pavement Management Systems (Sistemas de Gestión de Pavimentos)
RWD:	Rolling Wheel Deflectometer (Deflectómetro continuo rodante)
SCI:	Estructural Condition Index (Índice de Condición Estructural)
SGP:	Sistema de Gestión de Pavimentos



SHRP:	Strategic Highway Research Program (Programa Estratégico de Investigación de carreteras)
SMP:	Seasonal Monitoring Program (Programa de Monitoreo Estacional)
SN:	Structural Number (Número Estructural)
SN_{eff}:	Effective Structural Number (Número Estructural Efectivo)
SNC:	Número Estructural Modificado
SNP:	Número Estructural Ajustado
STOA:	Short Term oven Aging (Envejecimiento en horno en corto plazo)
SUCS:	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
TRRL:	Transport and Road Research Laboratory (Laboratorio de Investigación en Transporte y Carreteras)
TxDOT:	Texas Department of Transportation (Departamento de Transporte de Texas)
USACE:	US Army Corps of Engineers (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos)
VDOT:	Virginia Department of Transportation (Departamento de Transporte de Virginia)
VIZIR:	Vision Inspection de Zones et Itinéraires Á Risque (Visión Inspección de Zonas e Itinerarios en Riesgo)
WASHO:	Western Association of State Highway Officials (Asociación Occidental de Funcionarios de Carreteras Estatales)
WSDOT:	Washington State Department of Transportation (Departamento de Transporte del Estado de Washington)



INTRODUCCIÓN

La evaluación estructural de pavimentos tiene como fin conocer la condición estructural del pavimento en cualquier momento de su vida en servicio, para determinar su integridad estructural y capacidad de soporte; de tal manera que, a partir de su diagnóstico, se establezcan los tratamientos necesarios para conservar su nivel de servicio.

La evaluación estructural se realiza con dos enfoques; el primero, a través de ensayos destructivos como lo es el producto de la exploración geotécnica, mediante sondeos y apiques, para la evaluación in situ de las capas del pavimento o para, posteriormente, evaluar las muestras recobradas en laboratorio. El otro enfoque consiste en la ejecución de ensayo de tipo no destructivo, como son, por ejemplo, la realización de estudios de condición superficial del pavimento, estimación de espesores con georadar y, especialmente, el análisis de información deflectométrica, donde se destaca el empleo de equipos de alto rendimiento como el Deflectómetro de Impacto (FWD).

Como resultado de los objetivos del proyecto con código institucional C100 121 - 14 de la Fundación Universitaria Juan de Castellanos, en el presente libro el grupo de investigación Ciencia, Innovación y Tecnología - CIyT, adscrito a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Fundación Universitaria Juan de Castellanos, plantea ampliar el enfoque en la revisión de las técnicas de evaluación estructural existentes, evaluando técnicas cualitativas y cuantitativas que se valen conjuntamente de información de ensayos destructivos y no destructivos. Este proyecto enfatiza en el uso del FWD como equipo para realizar la evaluación estructural de pavimentos flexibles de tipo convencional, es decir, capas asfálticas, a las cuales subyacen materiales granulares sin tratar, todo el paquete estructural fundado sobre el suelo de subrasante. Con base en esta premisa, se da una guía de cómo realizar la evaluación estructural, desde la toma de datos en campo, siguiendo con su



normalización para ser usados, y su aplicación en técnicas cualitativas que brindan una primera indicación de la condición del pavimento, y su empleo en técnicas cuantitativas que suministran información más confiable sobre el estado del pavimento.

En las técnicas cuantitativas se explican varias que son de interés en ingeniería de pavimentos, que incluyen la estimación de módulos de las capas por retrocálculo y métodos de cálculo directo. También, se evalúa la condición del pavimento en conjunto al estimar su capacidad estructural y vida remanente, la cual se implementa en índices que brindan información sobre su condición estructural. Al final del documento, mediante ejemplos se realiza la aplicación de las técnicas documentadas, a partir de datos de estructuras reales en servicio.

La metodología de evaluación estructural a emplear queda a discreción del lector. La finalidad del libro es dar a conocer diversas técnicas para que, con su reiterado uso y retroalimentación, producto de la experiencia ganada al ser aplicadas, estas puedan ser calibradas, creando sistemas de clasificación con umbrales definidos que permitan establecer la condición estructural de pavimentos. De manera prospectiva, se pueden definir actividades de mantenimiento y/o rehabilitación, o con fines de seguimiento de la vida de servicio remanente de estructuras de pavimento, así como ser usadas en modelos de predicción del ciclo de deterioro del pavimento.

En el primer capítulo de este libro, se presentan los conceptos generales de la evaluación estructural mediante técnicas no destructivas y destructivas, con el fin de poner al lector en contexto.

El segundo capítulo profundiza sobre las técnicas de evaluación mediante ensayos destructivos. Allí, se da una guía para la realización de la exploración geotécnica, que incluye la programación, recuperación y ensayos a realizar a las muestras recuperadas. A partir de los resultados de laboratorio, se indica cómo realizar la caracterización de materiales para obtener parámetros estructurales de cada una de las capas que constituyen el pavimento, como lo son la subrasante, granulares intermedias y de rodadura en concreto asfáltico.

En el tercer capítulo se tratan los métodos de evaluación estructural no destructivos, el cual incluye la auscultación de deterioros superficiales



del pavimento mediante distintos métodos, equipos para la realización de ensayos no destructivos y características generales de las deflexiones. El cuarto capítulo presenta la metodología para realizar el análisis de deflexiones obtenidas mediante el deflectómetro de impacto, desde el procedimiento para la toma de deflexiones en campo, las correcciones que se deben realizar a estas para ser incorporadas en el análisis de definición de tramos homogéneos y la selección del cuenco característico que represente dicha sección.

En el quinto capítulo se encuentran las técnicas para la evaluación cualitativa del pavimento, la cual se realiza mediante la definición de umbrales de comportamiento para distintos parámetros obtenidos del cuenco de deflexiones en función de las características de la estructura de pavimento.

Del sexto al noveno capítulo se presentan las técnicas de evaluación estructural cuantitativa. En estos se incluye la determinación del módulo de las capas del pavimento mediante retrocálculo y cálculo directo, la evaluación de la capacidad estructural, la evaluación de los estados tensionales del pavimento y de varios índices para establecer la condición del pavimento en conjunto.

En los capítulos finales, décimo y undécimo, se presentan las distintas aplicaciones de la evaluación estructural, junto con ejemplos de cálculo en estructuras de pavimento reales en servicio.