

MECÁNICA DE SUELOS

APLICADA A VÍAS DE TRANSPORTE



Geotecnia vial - Tipos de suelo - Diseño de pavimentos - Mantenimiento y rehabilitación de pavimentos - Evaluación estructural de pavimentos

MECÁNICA DE SUELOS

APLICADA A VÍAS DE TRANSPORTE



Perú - México - Colombia - España - Chile - Ecuador - Bolivia - Uruguay - Guatemala - Costa Rica



Mecánica de suelos
Aplicada a vías de transporte

Autor: Wilfredo Gutiérrez Lázares

© Derechos de autor registrados:
Empresa Editora Macro EIRL

© Derechos de edición, arte gráfico y diagramación reservados:
Empresa Editora Macro EIRL

Coordinación de edición:
Magaly Ramon Quiroz

Diseño de portada:
Rudy Herrera Torres

Corrección de estilo:
Sonia Obregon Dionicio

Diagramación:
Eduardo Siesquén

Edición a cargo de:
© Empresa Editora Macro EIRL
Av. Paseo de la República N.° 5613, Miraflores, Lima, Perú

☎ Teléfono: (511) 748 0560
✉ E-mail: proyectoeditorial@editorialmacro.com
🌐 Página web: www.editorialmacro.com

Primera edición e-book: mayo 2016

Disponible en: macro.bibliotecasenlinea.com

ISBN N.° 978-612-304-330-8

ISBN e-book N.° 978-612-304-403-9

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

WILFREDO GUTIÉRREZ LÁZARES

Ingeniero Civil y Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería Geotécnica por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y candidato al grado de Doctor en Ciencias Administrativas por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM). Decano de la Facultad de Ingeniería Civil (FIC) de la UNI (2013-2015). Ha desempeñado cargos directivos en el ex Laboratorio Central del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, y en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Pavimentos de la FIC-UNI. Actualmente, es profesor principal de pregrado y posgrado en la UNI y la UPC, así como director gerente de GHAMA Ingeniería S.A., empresa consultora dedicada a la Ingeniería Geotécnica.

Profesor principal del Departamento Académico de Ingeniería Geotécnica
Decano de la Facultad de Ingeniería Civil (2013-2015)
Universidad Nacional de Ingeniería

Dedicatoria

A pepita

Agradecimientos

A los ingenieros Yolanda Herrera Chávarry[†], José Domínguez Dávila y Julio César Manrique Pino, por sus enseñanzas y motivación para mi iniciación en la especialidad de mecánica de suelos.

Índice

Introducción.....	19
-------------------	----

Capítulo 1

Introducción a la mecánica de suelos aplicada a vías de transportes	25
1.1 Problemas en la ingeniería vial	29
1.2 Actitud del profesional	31
1.3 Actividades del investigador.....	33
1.3.1 Visión general de las metodologías	35
1.4 Generalidad de la red vial nacional.....	36

Capítulo 2

Filosofía de diseño y causas de falla.....	41
2.1 Condición y serviciabilidad del pavimento	44
2.2 Vida remanente y rehabilitación	45
2.3 Causas de degradación del pavimento	47

Capítulo 3

Parámetros para el diseño de pavimentos.....	49
3.1 Análisis de la composición del tráfico.....	52
3.1.1 Proyección de ejes equivalentes	52
3.1.2 Actualización de ejes equivalentes	53
3.2 Capacidad de soporte de la subrasante	55
3.2.1 Utilidad de la información de campo.....	56
3.2.2 Capacidad de soporte de diseño	57
3.2.3 Correlación entre el PDC y CBR.....	61
3.2.4 Correlación entre el CBR y Mr.....	65
3.2.5 Valor de diseño	69

3.3 Valores de influencia.....	70
3.3.1 Nivel de confianza	70
3.3.2 Probabilidad	70
3.3.3 Pérdida de servicio.....	70

Capítulo 4

Diseño de la estructura del pavimento	71
4.1 Método AASHTO.....	73
4.1.1 Desarrollo de la ecuación AASHTO	75
4.2 Transformación a capas de pavimento.....	79

Capítulo 5

Consideraciones para la rehabilitación de pavimentos.....	81
5.1 Análisis de rehabilitación de pavimentos	84
5.2 Modelación geotécnica.....	88
5.3 Factores de influencia.....	89
5.3.1 Altitud	90
5.3.2 Número estructural existente (SNe)	95
5.3.3 Fricción neumático - Superficie	96
5.4 Sectorización.....	96

Capítulo 6

Evaluación superficial	99
6.1 Metodología CONREVIAl.....	102
6.2 Índice de condición del pavimento (PCI)	103
6.2.1 Interpretación del PCI	110
6.3 Evaluación de superficie de pavimento - PASER.....	114
6.4 Propuesta del MTC	116
6.5 Determinación del IRI y el PSI	119

Capítulo 7

Evaluación estructural	123
7.1 Método de ensayos no destructivos.....	125
7.1.1 Deflectometría método empírico.....	128
7.1.2 Deflectometría método matemático	131

7.2	Análisis de los resultados	134
7.2.1	Método embérico.....	134
7.2.2	Método elástico	138
7.3	Deflexiones FWD y Viga Benkelman	140
7.4	Estrategias de refuerzo	141

Capítulo 8

Rehabilitación y mantenimiento	145	
8.1	Análisis de rehabilitación	149
8.1.1	Proceso para evaluación	149
8.1.2	Recolección de información.....	151
8.1.3	Interpretación de resultados	152
8.2	Comentarios del modelamiento geotécnico	156
8.3	Actividades a desarrollar	158

Capítulo 9

Aspectos medioambientales.....	161	
9.1	Discusión	164
9.2	Realidad nacional.....	166
9.3	Medio físico.....	167
9.4	Estrategia metodológica	171
9.4.1	Alcance general	171
9.4.2	Propuesta de entregables	171
9.4.3	Articulación de actividades.....	172

Apéndice.....	173
Problemas propuestos.....	174

Bibliografía	188
---------------------------	------------

Lista de tablas

Tabla 1.1 Analogía de componentes en estructuras vial y edificación.....	29
Tabla 1.2 Estructura de investigación	34
Tabla 1.3 Costo en dólares americanos por kilómetro de carretera asfáltica	36
Tabla 1.4 Longitud total y sistema nacional	37
Tabla 1.5 Densidad de la longitud de carreteras por departamentos	38
Tabla 1.6 PBI de algunos departamentos.....	40
Tabla 2.1 Frecuencia de evaluación del pavimento.....	45
Tabla 2.2 Causas de fallas de un pavimento.....	47
Tabla 3.1 Estimación de tráfico proyectado (N)	54
Tabla 3.2 Correlación entre el Mr y el CBR.....	66
Tabla 3.3 Relaciones aproximadas entre suelos y los valores de CBR.....	68
Tabla 3.4 Relaciones aproximadas entre suelos y los valores de Mr	68
Tabla 3.5 Valor de diseño de percentil	70
Tabla 4.1 Coeficientes de equivalencia de espesor	79
Tabla 5.1 Parámetros de diseño estructura GEO-PAV.....	88
Tabla 5.2 Características de las regiones naturales.	91
Tabla 5.3 Coeficientes de reducción por deterioro de carpeta asfáltica	95
Tabla 6.1 Catálogo de fallas para el método del PCI	108
Tabla 6.2 Causa principal de las fallas en la determinación del PCI	111
Tabla 6.3 Interpretación de los valores de PCI y la condición del pavimento.....	114
Tabla 6.4 Rangos para definir magnitud de fallas	117
Tabla 6.5 Catálogo gráfico de fallas en pavimentos	118
Tabla 6.6 Estado superficial en función al IRI	120
Tabla 7.1 Valor de “t” y probabilidad de ocurrencia de $D > D_c$	135
Tabla 7.2 Análisis combinado de los resultados de evaluación	136
Tabla 7.3 Valores recomendados para R	138
Tabla 7.4 Diseño por etapas según deflectometría ($r = 5\%$)	142
Tabla 8.1 Niveles de prioridad para M&R.....	155

Lista de figuras

Figura 1.1 Capas requeridas para diferentes estructuras de pavimentos	28
Figura 1.2 Esquema cíclico para definir la hipótesis a contrastar.....	31
Figura 1.3 Proceso para la solución del problema y actitud profesional	32
Figura 1.4 Relación entre longitud de carretera y áreas superficiales	39
Figura 2.1 Situaciones de degradación del pavimento	44
Figura 2.2 Frecuencia de evaluación de pavimentos.....	45
Figura 2.3 Concepto de vida remanente	46
Figura 3.1 Curva de CBR sugerida por la USACE	59
Figura 3.2 Determinación de la línea 70, para el sectorizado.....	60
Figura 3.3 Formatos para evaluar el CBR en función del PDC	64
Figura 3.4 Determinación del CBR percentil	69
Figura 4.1 Evaluación de la fórmula AASHTO	76
Figura 4.2 Curvas de espesor de base granular para distintos tráfico.....	77
Figura 4.3 Solución del nomograma de la expresión AASHTO	78
Figura 5.1 Recolección y procesamiento de datos – programa SARP.....	86
Figura 5.2 Mapa de las ocho regiones naturales (Pulgar Vidal).....	91
Figura 5.3 Ejes transversales de diferentes altitudes y regiones.....	92
Figura 5.4 Ejes principales y elevaciones de las carreteras de penetración	94
Figura 5.5 Integración de información con fines de sectorizado.....	97
Figura 6.1 Adecuación del catálogo de fallas (CONREVIAL).....	102
Figura 6.2 Diagrama de flujo del método del PCI	104
Figura 6.3 Planilla de cálculo del PCI.....	109
Figura 6.4 Ejemplo de gráficas de degradación según falla.....	113
Figura 6.5 Formato empleado en el manual PASER.....	115
Figura 6.6 Condición de la superficie y actividades de mantenimiento	116
Figura 6.7 Equipo de medición de rugosidad Bump Integrator.....	119
Figura 7.1 Esquema de la transmisión de carga y equipo medidor de deformaciones	129
Figura 7.2 Deformada del pavimento y parámetros de comparación	130
Figura 7.3 Recolección y procesamiento de datos.....	133
Figura 7.4 Deflectograma para evaluar el estado estructural de la vía	134
Figura 7.5 Correlación entre ensayos de deflexiones FWD y VB	140
Figura 7.6 Integración de valores de Dc, Da y PCI	143
Figura 8.1 Planilla de recolección de datos.....	151
Figura 8.2 Salida típica del programa SARP	153



Figura 8.3 Alternativas de M&R.....	154
Figura 9.1 Tipos de pavimentos y su composición estructural.....	166
Figura 9.2 Capas de información	169
Figura 9.3 Capas y vector de análisis	170

Lista de fotografías

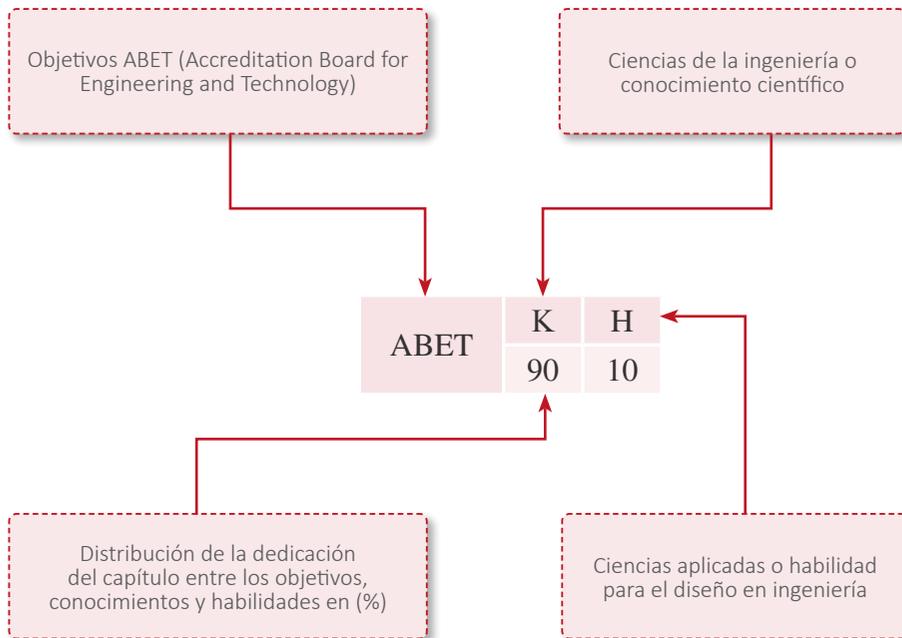
Foto 7.1 Medición de deflexiones con Viga Benkelman.....	128
Foto 9.1 Geomorfología diferenciada del territorio peruano.....	165

Lista de abreviaturas y símbolos

°C	Grados centígrados
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Official
a_i	Coefficiente de transformación de capas de pavimentos
BI_{prom}	Número obtenido con el rugosímetro Bump Integrator
c	Cohesión del suelo
CBR	California Bearing Ratio (Capacidad de Soporte de California)
CGR	Contraloría General de la República
CM, CV, CS	Cargas muerta, viva y por sismo
cm	Centímetros
CONREVIAl	Consortio de Rehabilitación Vial
D_{20}	Deflexión corregida, a la temperatura estándar de 20° C (1/100 mm)
D_{adm}	Deflexión admisible
D_c	Deflexión característica en mm
Def_{FWD}	Deflexión FWD (50 kN) ajustada a 20 °C.
Def_{VB}	Deflexión con Viga Benkelman (8.2 t) ajustada a 20 °C
D_h	Deflexión característica luego del refuerzo (1/100mm); (Dadm de diseño)
D_i	Espesor de la capa “i”
D_{ij}	Área que ocupa la falla en la superficie evaluada
D_o	Deflexión característica antes del refuerzo (1/100 mm)
ΔPSI	Diferencia entre índice de serviciabilidad inicial (Po) y el índice de serviciabilidad terminal (Pt)
D_t	Deflexión medida a la temperatura t (1/100 mm)
e	Espesor de la carpeta asfáltica (cm)
ED	Ensayo destructivo
END	Ensayo no destructivo
FD	Factor destructivo
FWD	Falling Weight Deflectometer
h	Espesor de refuerzo (cm)
IRI	International Roughness Index
k	Constante para capas granulares (1/ cm °C) 1×10^{-3}
kg	Kilogramo
kip	Kilo libras
kN	Kilo Newton
lb	Libras
LL	Límite líquido
ln	Logaritmo neperiano
LP	Límite plástico

M&R	Mantenimiento y rehabilitación
m_i	Coefficiente de drenaje de la capa “i”
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
Mr	Módulo resiliente
m s. n. m.	Metros sobre el nivel del mar
N	Número de ejes estándares equivalentes de 8.2 t (en millones)
n	Número de unidades de muestras a evaluar
Om	Ómnibus
PCI	Índice de la condición del pavimento
PDC	Penetrómetro dinámico de cono
Po	Serviciabilidad inicial
PSI	Índice de serviciabilidad
Pt	Serviciabilidad final
R	Rugosidad en IRI en m/km
Rc	Radio de curvatura
σ	Desviación estándar del PCI en las unidades de la sección
SARP	Sistema de Análisis de Rehabilitación de Pavimentos
Sj	Severidad que la falla presenta
SN	Structural number (número estructural)
SN _{diseño}	Número estructural de diseño
SN _{existente}	Número estructural existente
SN _{requerido}	Número estructural requerido
So	Error estándar combinado del tráfico proyectado y del comportamiento proyectado
t	Temperatura de la carpeta asfáltica (°C)
Ti	Tipo de falla
t	Tonelada
UEP	Unidad Ejecutora de Proyecto
VB	Viga Benkelman
w	Contenido de humedad
W ₁₈	Número proyectado de carga equivalente de 18 kip (18 000 lb) de aplicación de carga axial simple
Zr	Desviación estándar normal
γ	Peso unitario del suelo
Φ	Ángulo de fricción interna

Nomenclatura para el logro de objetivos de la ABET



ABET: Accreditation Board for Engineering and Technology. Refiere a los objetivos que permitió la acreditación de la carrera de Ingeniería Civil de la UNI, en disciplinas de ciencias de la ingeniería y ciencias aplicadas.

K: Refiere a las ciencias de la ingeniería o conocimiento científico, donde el profesor realiza una crítica a la realidad explicando, desde lo elemental hasta lo más complejo, el porqué de las cosas forjando en el alumno el saber sistemático, ordenado, coherente y verificable.

H: Refiere a las ciencias aplicadas o habilidad para el diseño en ingeniería, donde el alumno reproduce lo aprendido correctamente y con facilidad, según el conocimiento científico.

Prólogo

A lo largo de estos años y mediante los cursos dictados en la universidad, he tratado de transmitir lo que también a lo largo de los años aprendí. En muchos casos, experimenté y descubrí temas vinculados a la ingeniería, que confirman el aprestamiento al ingenio. He experimentado el ingenio en la resolución de problemas vinculados a las obras y el suelo, aplicando las herramientas existentes en el medio. Uno de los mayores problemas es cómo articular especialidades para obtener un buen resultado. Durante 28 años dedicados a la docencia, me he esforzado por hacerlo con decencia. El entorno y los amigos me entusiasman a aplicar lo aprendido fuera de las aulas. Desde joven, cuando me desempeñaba en la consultoría a empresas importantes del país, me esforzaba por desenvolverme con ética y de acuerdo a los valores que me brindó mi familia. Hoy, experimento una profunda gratitud a Dios por todo y trato de transmitir mi experiencia al prójimo.

Pienso haber hecho lo correcto en la transmisión conocimientos tanto en las aulas como en las oficinas en las que he practicado la consultoría y en las conferencias en las cuales han tenido la generosidad de invitarme. He sido honesto y sincero, me he basado siempre en una estructura de exposición que muestre al lector el porqué de las cosas. El mayor tiempo dedicado a la observación me permite comprender la realidad y explicarla, planteando una alternativa de solución.

Lo expuesto y mucho más me ha motivado a escribir el presente libro, cuyas páginas integran conocimiento, experiencia y casos reales, comentados en el aula. Escucho con satisfacción y modesto orgullo cómo algunas instituciones emplean y recomiendan, lo que alguna vez fue un recurso ingenioso empleado para el desarrollo de otros problemas de la ingeniería de transportes y que ahora lo toman como regla.

La ingeniería es mucho más y, por tal motivo, este libro integra en la especialidad métodos y metodologías que se innovan para que realmente sean útiles y no de uso mecanizado. Deseo que el presente libro pueda iniciarlos en la especialidad y que su contenido sirva de consulta a los que deseen incursionar en la mecánica de suelos aplicada a la geotecnia vial.

Introducción

En los últimos años, se ha dado un impulso sustancial a los trabajos relacionados con las carreteras y a pesar de que se han desarrollado varios cientos de kilómetros, no se cuenta con metodologías propias que se adecúen a la variedad de condiciones que presenta el territorio nacional. Por ello, se ha aplicado metodologías foráneas que suplen el desconocimiento de los especialistas. En diversas partes del mundo se desarrollan investigaciones puntuales sobre diversos problemas que se presentan en las carreteras, concluyendo en la generación de métodos y metodologías apropiadas para su solución.

Por lo general, los trabajos en geotecnia vial se orientan a determinar una secuencia lógica para afrontar cada problema que se encuentra a lo largo de las vías, estableciendo la estrategia que culmina en la solución. La publicación sobre la ingeniería aplicada a las vías de transportes tratan de establecer explicaciones a los diferentes fenómenos que ocurren sobre el tema, solo así se logra la solución.

La costa peruana presenta situaciones favorables de resistencia de suelos. Sin embargo, a medida que la red vial se aleja de esta, se presentan problemas diversos de acuerdo a la zona que atraviesa. Se aprecia que las técnicas de diseño se emplean indiscriminadamente. El problema se acentúa cuando las carreteras de penetración siguen un trazo transversal al país y se forman por rellenos o terraplenes en las grandes extensiones de la costa. Luego, las vías cambian a media ladera cuando empiezan a ascender; cambian en la zona de altiplanicie donde corresponde a grandes extensiones planas con suelos finos que están permanentemente saturados, con intemperismo severo y que su topografía impide el drenaje natural. Después, se presenta la selva alta con pendientes pronunciadas, con clima tropical, con vías a media ladera formada por suelos finos, tal vez con menos humedad, pero parcialmente susceptibles a las deformaciones; hasta llegar a la zona de selva baja con problemas de drenaje, de suelos finos, de lluvias intensas e intermitentes, de alta susceptibilidad a las deformaciones, con topografía plana y escasez de materiales granulares.

Por brindar un ejemplo, la carretera Pisco-Ayacucho, conocida como la vía de Los Libertadores, se inicia en la costa y llega hasta antes del valle del río Apurímac, evidenciando diferente altitud, clima, precipitación y especialmente tipos de suelos.

A pesar de las diferentes condiciones apreciadas, en las carreteras del país, aún se emplean los mismos métodos de diseño para estimar el espesor del pavimento, sin considerar que el suelo es el problema en el sustento de la estructura.

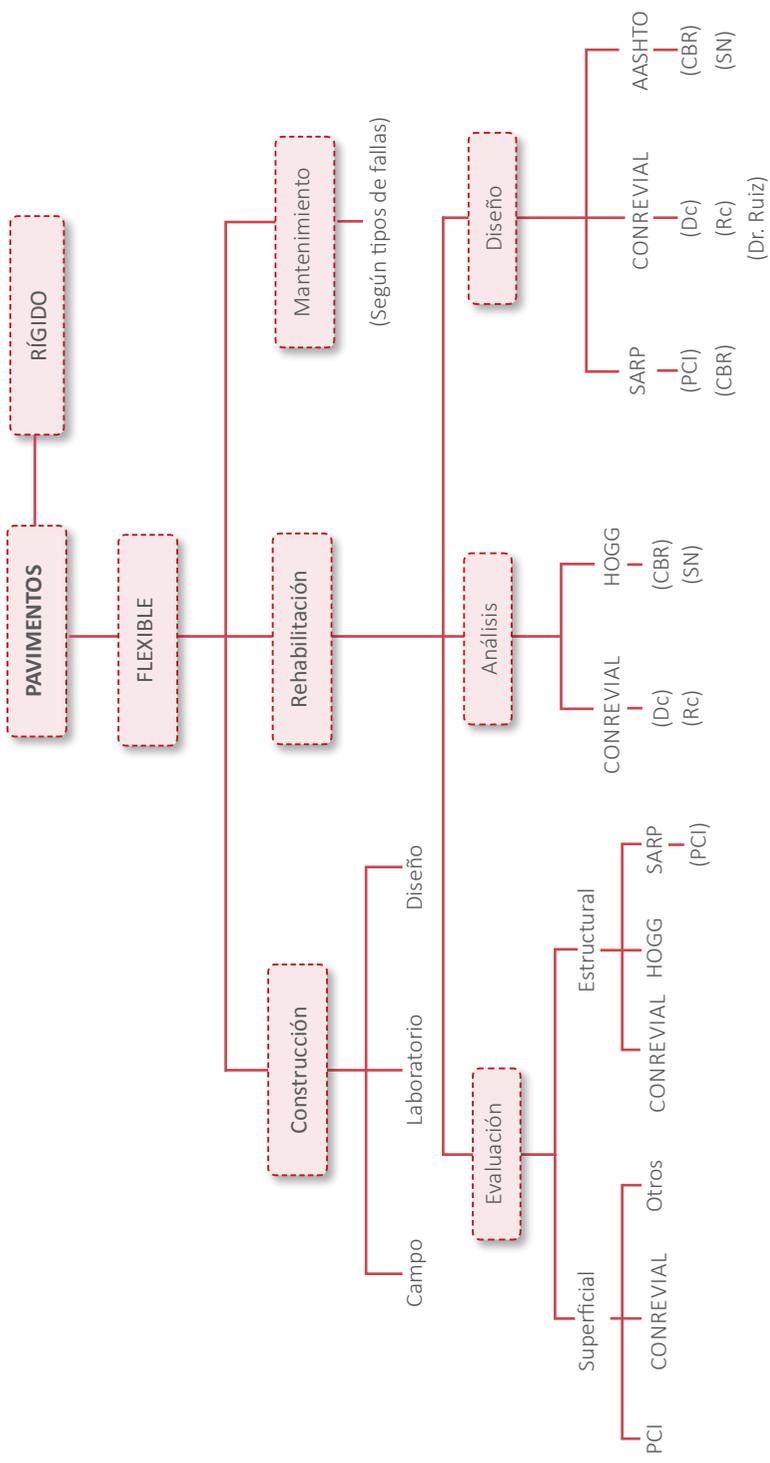
Al evaluar los problemas en diferentes regiones, se debe considerar también la estimación de los asentamientos que ocurren en zonas de materiales finos parcialmente saturados, donde se debe tomar en cuenta las cargas impuestas por la estructura (carga muerta o estática) y por los vehículos (carga viva o dinámica), como ejes equivalentes proyectados, ya que son los insumos que determinan el número estructural de diseño, demandando un análisis más profundo y un adecuado conocimiento de la mecánica de suelos y su interacción con la estructura del pavimento.

Los temas abordados responden a la pauta sugerida en el sílabo del curso que se imparte en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería y que tiene tres objetivos fundamentales. Primero, presentar los conceptos básicos y principios fundamentales de mecánica de suelos aplicada en una simple pedagogía empleando los conocimientos de los alumnos en mecánica, física y matemática. Segundo, integrar principios modernos de aprendizaje, enseñando técnicas, y ayudas de aprendizaje que asistan al estudiante en la comprensión del tema. Tercero, proveer un sólido conocimiento que motive al estudiante en el aprendizaje de la ingeniería geotécnica vial.

El libro contribuye a que el lector tenga los conocimientos básicos sobre los diferentes tipos de suelos sobre los cuales descansan las obras de vías de transportes. También busca que se encuentre capacitado a reconocer y resolver problemas en situaciones desventajosas para la demanda de esfuerzos transmitidos por las estructuras de pavimento y acrecentar la motivación para continuar los estudios de posgrado en la especialidad.

La red de aprendizaje que presenta la estructura del libro responde a la mostrada, de la cual se aprecia que la orientación predilecta es a los pavimentos flexibles. Se aprecia tres grandes grupos correspondientes a la construcción de un pavimento nuevo, donde se espera integrar y articular las labores de campo, laboratorio y diseño del mismo; luego la rehabilitación, en la cual existiendo la estructura de pavimento, se requiere de trabajos que permita devolver las condiciones iniciales al pavimento; y finalmente la de mantenimiento, en la cual se comentan las actividades a realizar, para que la estructura de pavimento alcance como mínimo el tiempo para el cual fue diseñado.

La estructura adoptada considera capítulos asociados a unidades de aprendizaje, estructurados para alcanzar un logro determinado.



El capítulo 1, Introducción a la mecánica de suelos aplicada a vías de transporte, comprende la secuencia lógica de afrontar las áreas en el curso. Reconoce la importancia de la geotecnia en obras de ingeniería vial, identificándose con la especialidad.

El capítulo 2, Filosofía de diseño y causas de fallas, comprende la finalidad del adecuado diseño de las estructuras de los pavimentos y la correcta elección de los espesores de sus diferentes capas. Contrasta gráficamente la pérdida de servicio o condición del pavimento, comprendiendo el por qué de la degradación de los pavimentos, contrastando gráficamente su deterioro a lo largo de los años y evaluando la influencia de las diferentes actividades desarrolladas en la ejecución de un proyecto.

El capítulo 3, Parámetros para el diseño de pavimentos, identifica el tráfico de diseño, basado en el tipo de vehículo, la composición del tráfico y la determinación de la carga futura de diseño. Además, evalúa la capacidad de soporte del suelo de subrasante para luego determinar el valor de diseño.

El capítulo 4, Diseño de la estructura del pavimento, determina e interpreta el número estructural (SN) de diseño de la estructura de un pavimento. Transforma el SN a capas componentes de la estructura y compara alternativas.

El capítulo 5, Consideraciones para la rehabilitación del pavimento, determina el número estructural de las capas de una estructura de pavimento existente. Determina la degradación de la estructura y halla la estructura requerida para un mayor tiempo de vida útil.

El capítulo 6, Evaluación superficial, aplica métodos de evaluación del estado superficial de los pavimentos. Define fallas identificando la magnitud y la densidad dentro del sector evaluado. Determina la condición del pavimento para el cual concluye con el valor del PCI.

El capítulo 7, Evaluación estructural, aplica métodos no destructivos de evaluación estructural del pavimento, interpretando resultados y planteando alternativas de solución con fines de diseño o refuerzo. Reconoce la existencia de programas de rehabilitación y de gerencia de inversión en los pavimentos, que permita una distribución racional de las inversiones.

El capítulo 8, Rehabilitación y mantenimiento, plantea las alternativas de solución a los problemas relevados con las metodologías establecidas en el curso y particulariza las soluciones de acuerdo a la magnitud de los problemas.

El capítulo 9, Aspectos medioambientales, aborda temas como discusión, realidad nacional, medio físico y estrategia metodológica.

Al completar los temas de este libro, el lector podrá identificar, analizar y solucionar problemas relacionados con la construcción, rehabilitación y mantenimiento de los pavimentos y carreteras, que actualmente se desarrollan, aplicando objetiva y convenientemente los criterios fundamentales de la mecánica de suelos aplicada, de tal manera que se pueda insertar inmediatamente a la actividad profesional.

Capítulo

1

Introducción a la mecánica de suelos aplicada a vías de transportes

ABET

K

H

90

10

Logros:

Comprende la secuencia lógica de afrontar cada uno de los capítulos del presente libro. Reconoce la importancia de la geotecnia en obras de ingeniería vial, identificándose con la especialidad de la mecánica de suelos.

TEMARIO:

- › *Problemas en la ingeniería vial*
- › *Actividades del investigador*
- › *Generalidad de la Red Vial Nacional*

INTRODUCCIÓN

El ingeniero geotécnico se forma por la experiencia de sus trabajos y realiza los ajustes necesarios a los diferentes procesos de evaluación existentes y que no necesariamente se ajustan a todas las realidades. Sin embargo, pasa inadvertido el reconocer al pavimento como una estructura de ingeniería, al emplear los suelos como elementos de construcción y no así el tradicional concreto armado. A su vez, esta estructura de pavimento debe descansar sobre un suelo de cimentación de características físicas, y mecánica particulares y dependientes del trazo de la carretera en su conjunto.

La integración de los conceptos de la mecánica de suelos aplicada a las vías de transporte, propicia los tratados en geotecnia vial, permitiendo identificar problemas, analizarlos y establecer recomendaciones de actividades no tradicionales, adecuadas a las condiciones del entorno donde se desarrolla la obra.

Los suelos, siendo los materiales de obra más antiguos y de comportamiento complejo en la ingeniería, requieren de comprensión profunda de sus características físicas y mecánicas, que permitan articular etapas como el manejo de métodos rutinarios de análisis y diseño, con los trabajos de construcción y rehabilitación de carreteras.

Por lo general, la información recopilada en campo, para el diseño de pavimentos, es procesada empleando metodologías foráneas que no necesariamente se ajustan a la realidad. Por ello, demanda un arduo trabajo para que el manejo racional de la información culmine en recomendaciones coherentes que eviten gastos adicionales a los previstos para la construcción o rehabilitación de la carretera. La sostenibilidad del diseño dependerá del modelamiento estructural empleado para el pavimento, basado en la continua innovación de las metodologías empleadas, que en algún momento culmine con un proyecto de norma peruana de diseño de pavimentos para diferentes regiones del Perú.

Además de la falta de enfoque del método de diseño empleado frente a la realidad, para nuestro territorio no es lo mismo diseñar una carretera en la costa, que en la altiplanicie o en la zona de selva. En esta última zona, la red vial es exigua frente a las de otras regiones y los suelos en cada una de ellas son totalmente diferentes, al punto que en zonas de selva se necesitaría de ensayos de resistencia al esfuerzo cortante y hasta de consolidación, para medir

resistencia y deformación respectivamente. Por ello, es importante sensibilizar al lector a la comprensión de la mecánica de suelos y a las transmisiones de cargas de la estructura del pavimento, así como su interacción particular.

Por otro lado, se ha optado por desarrollar los trabajos, considerando especialmente a los pavimentos flexibles, debido al reflejo y sensibilidad que presentan frente a los problemas que se suscitan en los suelos de subrasante. Las características de los materiales de subrasante definen la capacidad de soporte que determina la estructura del pavimento. A menores resistencias, mayores son los paquetes estructurales de los pavimentos y, por el contrario, a mayor resistencia de los materiales de subrasante o suelo de cimentación, menores serán los paquetes estructurales. Por lo general, la capa de rodadura descansa en dos capas muy similares, definidas como base granular y subbase. La primera está formada por piedra chancada y la segunda por material al menos zarandeado. La Figura 1.1 compara dos estructuras de pavimentos, en la cual el pavimento rígido puede obviar la capa de base, mientras que el pavimento flexible mantiene todas las capas requeridas. Además, el pavimento rígido presenta la resistencia suficiente para dar transitabilidad aun se apoye en tres puntos, haciéndolo imperceptible a los problemas de subrasante.

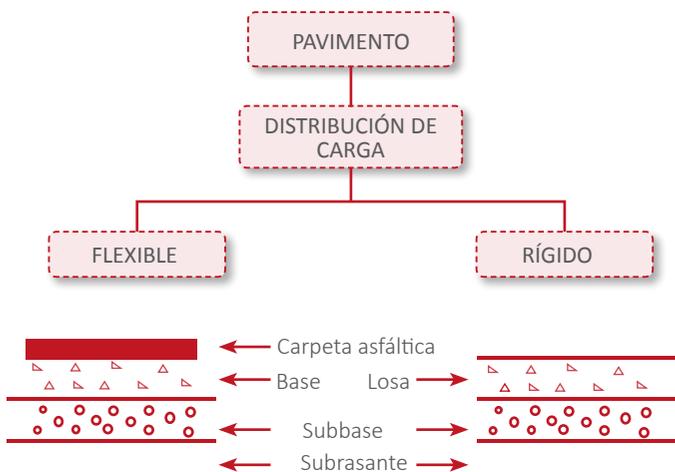


Figura 1.1 Capas requeridas para diferentes estructuras de pavimentos

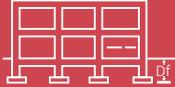
Fuente: El autor.

1.1 PROBLEMAS EN LA INGENIERÍA VIAL

El mayor problema del profesional, observado para el desempeño en la mecánica de suelos, es el desconocimiento del comportamiento del suelo frente a las obras civiles. En situaciones adversas de resistencia del suelo, terminan confirmando su decisión. La asociación de la ingeniería civil y la infraestructura responde inmediatamente a las edificaciones, habiendo muchas otras especialidades. Por ello, en primer lugar se debe encontrar la analogía existente entre una edificación, que bien se entiende, con la estructura de un pavimento, que trata de mostrar su importancia.

La Tabla 1.1 presenta analogías entre valores de diseño requeridos por una estructura de un pavimento como de una edificación. Ambas estructuras requieren de la capacidad de soporte del suelo para determinar las dimensiones de obra.

Tabla 1.1 Analogía de componentes en estructuras vial y edificación

N.º	Componente	Edificio 	Pavimento 
1	Solicitaciones de carga	CM, CV, CS	N
2	Material de apoyo de la estructura	Suelo de cimentación	Subrasante
3	Ensayos de resistencia al esfuerzo cortante	Corte directo, triaxial, compresión simple	CBR
4	Parámetros mecánicos de diseño	c, Φ	Número de CBR
5	Características físicas de sectorización	γ	Partículas, LL, LP, w, γ
6	Parámetro final de transformación	La cuantía (ρ) a número de varillas	Número estructural (SN) a capas componentes

Fuente: El autor.

Las discusiones sobre las capas componentes del pavimento dependen de diferentes aspectos que no siempre responden a las demandas técnicas. Si bien, por un lado, se puede emplear programas de cómputo para la determinación de los espesores de las diferentes capas que conforman la estructura, poco se puede saber sobre sus factores de seguridad. Si el operador es consciente de la filosofía del diseño, la solución final dependerá de la decisión y el compromiso del profesional y su experiencia.

Existen múltiples causas de la degradación prematura de los pavimentos flexibles. La idea principal radica en comprender el por qué de la degradación de los pavimentos, contrastando gráficamente resultados de las evaluaciones que miden su deterioro a lo largo de los años.

Uno de los principales problemas corresponde a la determinación del tráfico de diseño (N) a emplear y las consecuencias que una mala estimación puede acarrear, como por ejemplo el obtener una estructura de pavimento que se encuentre infradiseñada. El problema se agrava cuando la estimación de las cargas de ejes estándares varían por encontrarse en zona de frontera, como es el caso de la carretera Interoceánica¹, que recibirá tráfico de Bolivia y Brasil cuyos ejes estándares alcanzan las 10 toneladas y en algunos casos hasta 13 toneladas por eje, mientras que en el Perú las cargas de diseño corresponden a solo 8.2 toneladas.

En algunos casos, las obras presentan serias deficiencias por emplear procedimientos constructivos sin el debido control de calidad. En otras, las labores de la supervisión se apoyan en la logística del contratista haciéndose dependiente y cómoda de ejecutar. Sin lugar a dudas los procesos constructivos deficientes generan estructuras débiles que no alcanzarán el tiempo de servicio proyectado.

Por otro lado, los proyectistas subcontratan la participación de profesionales, generando heterogeneidad en los trabajos realizados y como consecuencia un proyecto antieconómico, ya que tendrá una solución inadecuada al problema real.

Otra causa de falla de los pavimentos se aprecia al considerar sistemáticamente metodologías de diseño a toda la vía por igual, sin discriminar sectores o regiones y obviando sus factores ambientales, geográficos y topográficos.

Finalmente, los trabajos de mantenimiento de las vías son limitados e inadecuados, generando trabajos correctivos prematuros o la pronta rehabilitación.

¹ Cfr.: Estudio Definitivo de Rehabilitación, Proviás Nacional

Pero, qué hay de cierto en las metodologías empleadas durante los últimos 15 años; cuál o cuáles de los métodos empleados que representan realmente la modelación geotécnica de la estructura del pavimento a proyectar; qué ha sucedido con los análisis tradicionales de diseño. Estas y otras preguntas deben motivar a que los profesionales elaboren documentos de consulta acorde con la realidad nacional.

1.2 ACTITUD DEL PROFESIONAL

Se debe reconocer que cada obra y cada lugar demandan situaciones particulares que requerirán soluciones particulares. Por lo tanto, se deberá tener una actitud contestataria a todo aquello que discrepe con lo que se observa. En muchos de los casos, se emplean métodos que no deberían ser aplicables, sin embargo la sistematización y el procesamiento de software ciega al diseñador y no toma en cuenta las limitaciones que presentan los métodos. Los modos operativos responden a metodologías foráneas, que debieran estar afectas a las variantes o adecuaciones hechas por el especialista, de tal manera se logre la particularización al medio tecnológico y de realidad regional.

Todo proceso se basa en la confrontación de los métodos, específicamente en el método científico; observación y deducción planteado por Karl Popper. La Figura 1.2 esquematiza el proceso por desarrollar para solucionar un problema puntual ocurrido, tan igual como actuaría un consultor de la especialidad.

El éxito de la mayoría de los trabajos hechos por los ingenieros consultores se sustenta en actividades, entre las cuales se puede considerar: (1) el constituirse al lugar de los hechos, (2) observar detenidamente el problema, (3) especular sobre la posible causa, (4) plantear una hipótesis y finalmente (5) contrastarla.

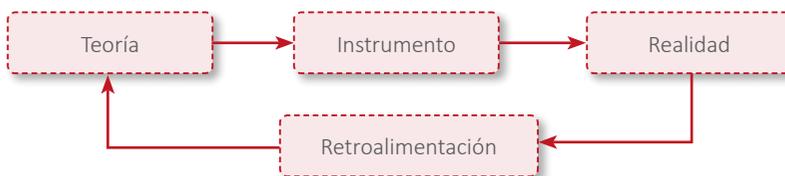


Figura 1.2 Esquema cíclico para definir la hipótesis a contrastar

Fuente: El autor.

De las contrastaciones, de cada una de las posibles causas planteadas, se derivan las alternativas de soluciones al problema. Por supuesto, que en todo este proceso están implícitos el conocimiento y la experiencia de la persona. Muchos cuentan con el conocimiento y se hacen teóricos, ya que terminaron la universidad y siguieron estudios de posgrado de manera continua. Por otro lado, se tiene los que egresaron y fueron trabajar en obras, tal vez en provincia con la escasez de tiempo para realizar estudios de perfeccionamiento y otros. Sin embargo, por separado no es mucho lo que se puede avanzar; ambas aptitudes logran un equilibrio integrándose mediante el ingenio y sentido común.

La Figura 1.3 presenta las actividades, las aptitudes y actitudes que debe atender el profesional para encontrar alternativas de solución y de ellas la solución definitiva en lo posible.

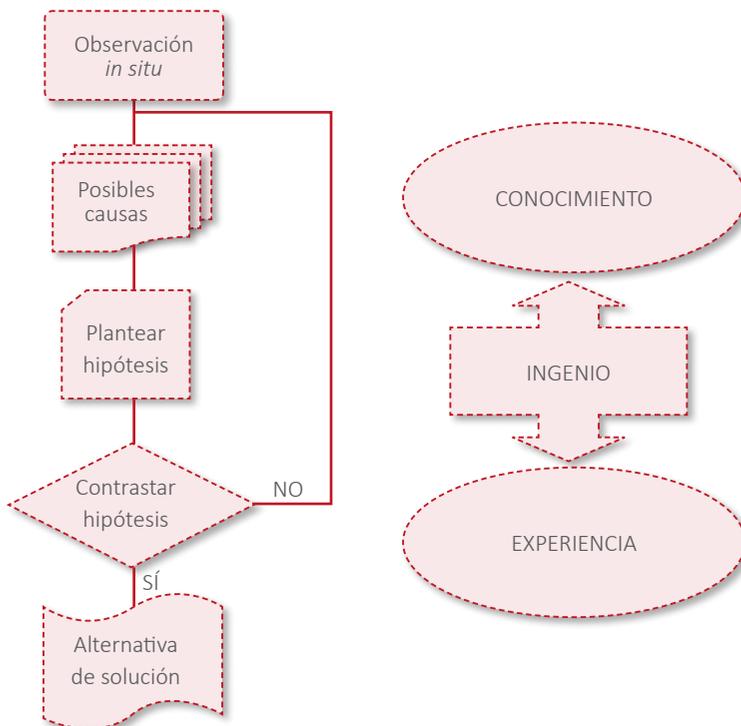


Figura 1.3 Proceso para la solución del problema y actitud profesional

Fuente: El autor.

1.3 ACTIVIDADES DEL INVESTIGADOR

Identificar y resolver un determinado problema requiere que el profesional desarrolle actividades ordenadas que conduzcan a su solución. A manera general se necesita:

- Evaluar los resultados obtenidos sistemáticamente, asociándolos a un modelo tipo hipótesis el cual permita su contrastación con la realidad.
- Desarrollar los trabajos integrando a la mecánica de suelos en la resolución del problema debido a la interacción suelo–estructura.
- Aplicar el modelo a las vías de transportes con superficie de rodadura compuesta por asfalto y agregados pétreos.
- Identificar tendencias o procesar información para obtener parámetros de diseños propios.
- Finalmente, encontrar una estructura que absorba los esfuerzos transmitidos por las cargas solicitadas.

Los trabajos desarrollados ordenadamente permiten proponer la metodología de análisis y diseño de los pavimentos flexibles, basados en métodos con modelamiento geotécnico acorde con la realidad regional peruana, resolviendo los problemas de manera ingeniosa.

Las alternativas podrán comprender etapas como, objetivos y resultados, según el detalle presentado en la Tabla 1.2, que propone una manera ordenada de establecer una labor de investigación, conducentes a plasmar el trabajo en un documento a compartir. Todas estas etapas se asocian a lo tratado en el presente trabajo y que serán abordadas en su debida oportunidad en cada capítulo incluido.

Tabla 1.2 Estructura de investigación

N.º	Etapas	Dependencia (objetivo)	Resultado esperado
1	Planteamiento metodológico	Establecer el alcance del trabajo.	Trabajo ordenado y motivador.
2	Estado del arte	Búsqueda de las últimas tendencias sobre el tema a tratar.	Conocer sobre la existencia de los últimos tratados a nivel nacional y mundial.
3	Marco teórico	Establecer el conocimiento mínimo requerido para el desarrollo del trabajo, señalando métodos y metodologías.	Manejar las herramientas a emplear, entendiendo sus fundamentos y limitaciones.
4	Modelación geotécnica del pavimento	Establecer la mejor analogía entre lo analítico y la realidad.	Contrastar la hipótesis planteada como alternativa de solución, empleando e innovando metodologías. Empleo de software. GEO-PAV (Modelamiento GEOtécnico de PAVimento flexible).
5	Gestión en la geotecnia vial	Administrar lo planteado como alternativa de solución.	Diseñar, administrar y controlar lo propuesto como alternativa de solución. Empleo de programas. SARP, GIP, G2V-PRO (Gestión en la geotecnia vial).

Fuente: El autor.

El modelamiento geotécnico de la estructura a ensayar permite determinar los parámetros de diseño más adecuados, necesarios y suficientes. Estos parámetros serán analizados de manera racional, para procesar coherentemente la información recopilada en las diferentes evaluaciones tanto de campo como de gabinete.

Se debe entender que existen limitaciones en el diseño, ya que la solución a las interrogantes científicas se asumen con la hipótesis. Se sugiere aplicar metodologías de análisis y diseño de estructura de pavimentos acorde con la realidad de la zona del país. Mediante la aplicación de un modelamiento

geotécnico, que proporcione diseños seguros y racionales, se valora las particularidades de los tipos suelos y de las cargas actuantes sobre la futura estructura.

1.3.1 VISIÓN GENERAL DE LAS METODOLOGÍAS

Los trabajos en carreteras están orientados según lo que establece los términos de referencia del Ministerio de Transporte (MTC). El profesional requerirá de experimentos y teorías en sus diferentes etapas de los proyectos viales. Por ejemplo, el tradicional uso propuesto por el Consorcio de Rehabilitación Vial (CONREVIAL) se basa en un catálogo de fisuras, para determinar las fallas del pavimento; y que empleando la Viga Benkelman, evalúa las características estructurales del mismo. El método del Índice de la Condición del Pavimento (PCI), basado en un catálogo de 19 fallas, establece mejores valores de evaluación superficial al considerar no solo los tipos de fallas, sino también su densidad en la superficie de rodadura. Con menor incidencia se recomienda el método Pavement Surface Evaluation and Rating (Paser) desarrollado en el Centro de Información del Transporte de la Universidad de Wisconsin, cuyo catálogo de fallas se basa en una escala gráfica con categorías que varían entre 1 a 10, para indicar de la peor a la mejor condición superficial, respectivamente.

Se incluye comentarios sobre el equipo Falling Weight Deflectometer (FWD). El Sistema de Análisis de Rehabilitación de Pavimentos (SARP) integra los resultados de los trabajos obtenidos mediante evaluación superficial, evaluación estructural y mediante ensayos destructivos, para luego aplicar la Gerencia de Inversión de Pavimentos (GIP), entre otros.

Se debe tener en cuenta que los temas tratados se relacionan con otros tipos de investigaciones y especialidades, proporcionando herramientas e insumos necesarios para establecer metrados y análisis de precios unitarios y la posterior determinación del presupuesto de obra de mantenimiento o rehabilitación.

Si se desea establecer una diferencia importante de lo planteado en el presente trabajo y lo que realmente se realiza en el medio profesional, se puede considerar que la estrategia de trabajo propuesto como GEO-PAV, que involucra modelamiento GEOTécnico de PAVimento flexible, se orienta a la integración de datos necesarios para correlacionar los mé-

todos y las variantes efectuadas. Las metodologías foráneas y concebidas para una realidad diferente a la nuestra discrepan de la realidad nacional. La pauta de estas metodologías de evaluación de pavimentos responde de igual forma a diferentes situaciones, sin particularizar el análisis a los verdaderos intereses de nuestras carreteras.

La importancia de un diseño racional y lógico requiere de metodologías adecuadas a la realidad nacional con modelos de estructuras a proyectar verificando sus componentes, aplicando la teoría de seguridad y valorando las particularidades de los suelos y cargas de diseño.

1.4 GENERALIDAD DE LA RED VIAL NACIONAL

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) ha privilegiado más al pavimento flexible por su relativo bajo costo inicial, permitiendo construir mayor longitud de carreteras sustentando la integración de más centros poblados. La tabla 1.3 muestra el costo por kilómetro de carretera construida en las regiones del país que presentan topografía variada. Se aprecia que el costo se acrecienta a mayor dificultad topográfica, pero, además, los costos son más elevados según se ingresa hacia la Amazonía.

Tabla 1.3 Costo en dólares americanos por kilómetro de carretera asfáltica

Topografía	Costa	Selva	Sierra
Plano	381,000	472,000	475,003
Ondulado	424,000	520,500	556,003
Montañoso	600,000	728,000	866,003

Fuente: <http://www.mtc.gob>.

La página web del MTC indica, además, que la longitud total de la red vial es igual a 78.554,02 km, dividida en sistemas de carreteras nacional (17.094,65 km), departamental (14.595,74 km) y vecinal (46.863,64 km). La tabla 1.4 presenta las longitudes de carreteras según los departamentos, ordenadas de mayor a menor de acuerdo a la longitud total y para los diferentes sistemas. De estas tablas, se aprecian los departamentos de Loreto, Madre de Dios y Ucayali, que representan a aquellos en los que han construido las menores longitudes, aproximadamente un 4.5 % del total de la red. Un caso especial se observa con el departamento de Tumbes, que sin estar en la Amazonía también presenta poca longitud de carretera construida.

Tabla 1.4 Longitud total y sistema nacional

N.º	Departamento	Nacional	Departamental	Vecinal	Longitud total (km)
1	Junín	869.65	592.54	4962.35	6424.54
2	Arequipa	1028.63	1390.4	3741.43	6160.46
3	Cajamarca	1099.9	761.44	3740.84	5602.18
4	Cusco	804.38	1706.96	2972.65	5483.99
5	Puno	1346.29	1219.57	2809.8	5375.66
6	Áncash	1320.59	1133.35	2613.02	5066.96
7	Lima	1275.79	597.76	2918.91	4792.46
8	Ayacucho	598.9	935.02	2904.01	4437.93
9	Piura	858.2	583.85	2826.5	4268.55
10	La Libertad	750.27	790.25	2375.21	3915.73
11	Huancavelica	412.11	736.46	2447.71	3596.28
12	Huánuco	854.29	368.85	1844.1	3067.23
13	Apurímac	559.15	544.6	1819.4	2923.15
14	Ica	846.94	345.4	1224.2	2416.54
15	Pasco	469.56	568.62	1321.15	2359.33
16	Tacna	609.56	483.3	910.01	2002.87
17	San Martín	709.36	185.85	1107.06	2002.27
18	Lambayeque	502.3	109.4	1268.7	1880.4
19	Moquegua	459.68	267.3	976.6	1703.58
20	Amazonas	651.66	391.12	608.86	1651.64
21	Madre de Dios	440.73	55.5	460.53	956.76
22	Tumbes	198.75	333.8	369.8	902.35
23	Ucayali	383.81	0	435.85	819.66
24	Loreto	44.15	494.4	204.95	743.5

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Por otro lado, la Tabla 1.5 presenta, además, la longitud de la carretera y las áreas superficiales de cada departamento. La columna de colores diferencian las regiones de costa, sierra y selva, respectivamente.

Se aprecia que los departamentos de la Amazonía (Loreto, Ucayali y Madre de Dios) y Tumbes son los que presentan menor densidad de longitud de carretera.

Tabla 1.5 Densidad de la longitud de carreteras por departamentos

N.º	Departamento	Long. total (km)	Área superficial ² (km ²)	Aporte a la red vial (%)	Aporte a la superficie (%)	Densidad (km/km ²)
1	Amazonas	1.651,64	41.297,12	2,1	3,0	4,0
2	Áncash	5.066,96	35.029,18	6,5	2,5	14,5
3	Apurímac	2.923,15	20.654,56	3,7	1,5	14,2
4	Arequipa	6.160,46	63.527,62	7,8	4,6	9,7
5	Ayacucho	4.437,93	43.814,80	5,6	3,2	10,1
6	Cajamarca	5.602,18	35.417,82	7,1	2,6	15,8
7	Cusco	5.483,99	76.224,89	7,0	5,5	7,2
8	Huancavelica	3.596,28	21.078,96	4,6	1,5	17,1
9	Huánuco	3.067,23	35.314,57	3,9	2,6	8,7
10	Ica	2.416,54	21.305,52	3,1	1,5	11,3
11	Junín	6.424,54	43.384,42	8,2	3,1	14,8
12	La Libertad	3.915,73	24.790,80	5,0	1,8	15,8
13	Lambayeque	1.880,40	16.585,90	2,4	1,2	11,3
14	Lima	4.792,46	34.796,87	6,1	2,5	13,8
15	Loreto	743,50	478.336,15	0,9	34,7	0,2
16	Madre de Dios	956,76	78.402,71	1,2	5,7	1,2
17	Moquegua	1.703,58	16.174,65	2,2	1,2	10,5
18	Pasco	2.359,33	21.854,07	3,0	1,6	10,8
19	Piura	4.268,55	33.067,00	5,4	2,4	12,9
20	Puno	5.375,66	73.382,44	6,8	5,3	7,3
21	San Martín	2.002,27	53.063,60	2,5	3,8	3,8
22	Tacna	2.002,87	14.766,63	2,5	1,1	13,6
23	Tumbes	902,35	4.731,00	1,1	0,3	19,1
24	Ucayali	819,66	91.858,00	1,0	6,7	0,9
Total		78.554,02	1.378.859,28	100,0	100,0	

Fuente: El autor.

2 Cfr.: <http://es.shvoong.com/humanities/history/1883616-regiones-departamentos-del-peru-parte/>

Los aportes a la red vial y a la superficie relacionan los valores por departamento con respecto al total. La última columna muestra la relación de longitud entre el área (km/km^2), que permite una evaluación de densidad por departamento, graficado en la Figura 1.4.

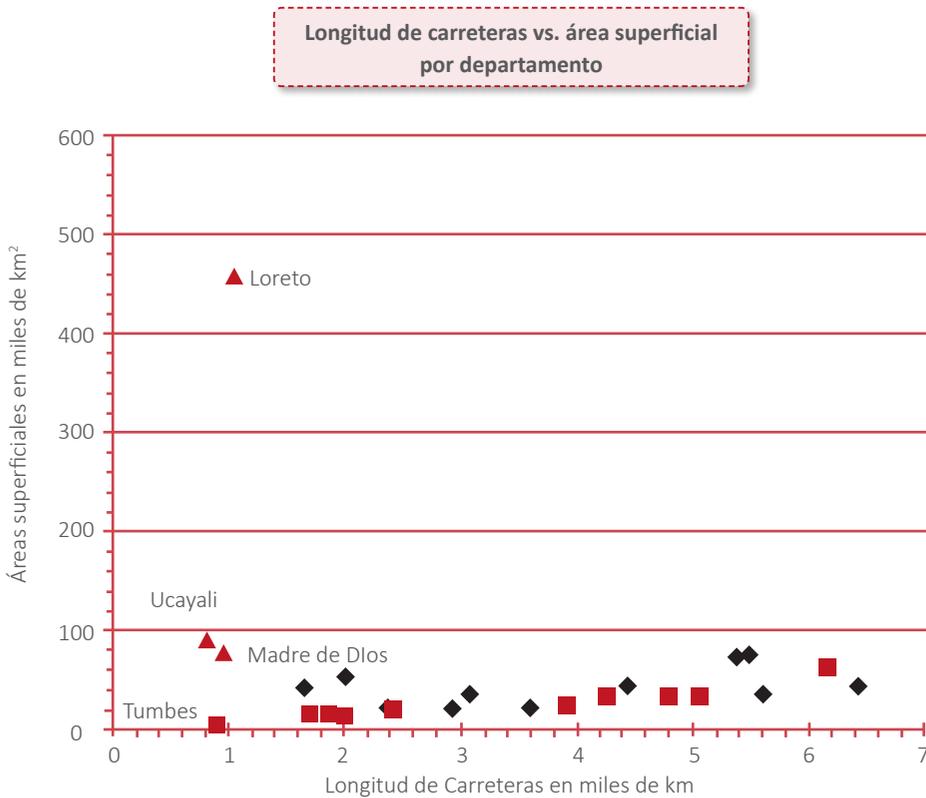


Figura 1.4 Relación entre longitud de carretera y áreas superficiales

Fuente: El autor.

Es importante considerar otras variables como población en cada uno de los departamentos, área de influencia de la carretera, el PBI, o el ingreso per cápita. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI)³, el crecimiento del Producto Bruto Interno (PBI) en 15 departamentos se ubicó por encima del promedio nacional durante el año 2009 (0.9 %).

³ Cfr.: <http://www.inforegion.pe/portada/66010/pbi-de-15-departamentos-crecio-por-encima-del-promedio-nacional/>

La Tabla 1.6 señala que los departamentos que tuvieron las mayores tasas de crecimiento anual durante el año 2008 fueron Ayacucho, Cajamarca y Apurímac. Además, el departamento de la Amazonía alcanza valores como Ucayali (2.3 %), Loreto y Tumbes (2.2 %) y Madre de Dios (6.1 %), lo-grado por las actividades de manufactura en productos de agroindustria, agroexportación, pesca y servicios gubernamentales.

Tabla 1.6 PBI de algunos departamentos

Detalle	Departamento	% PBI
Mayores tasas de crecimiento anual durante el año 2008	Ayacucho	11
	Cajamarca	7,1
	Apurímac	5,3
Departamentos de referencia de la investigación	Ucayali	2,3
	Loreto y Tumbes	2,2
	Madre de Dios	6,1

Fuente: Síntesis de Cuentas Nacionales del Perú: PBI por Departamentos, 2001- 2009.

En los últimos años, la mayoría de las carreteras mantenidas o rehabilitadas (M&R) se han deteriorado prematuramente disminuyendo la condición de servicio de la vía, demandando trabajos correctivos y complementarios antes de lo previsto. Estas situaciones se observan especialmente en las carreteras de penetración, al no haberse tomado en cuenta variables que modifican los diseños de los pavimentos, demandando mayor inversión que la inicial.

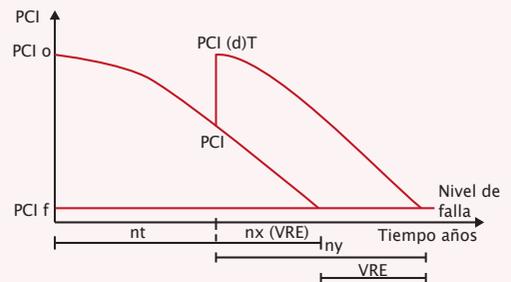
En las vías de penetración a la Amazonía se presentan factores de influencia, como lluvia, temperatura, altitud, materiales de construcción, tipos de suelos, topografía, entre otros, que los métodos tradicionales de diseño no contemplan, obteniendo una estructura de pavimento vulnerable a la degradación prematura.

Capítulo

2

Filosofía de diseño y causa de falla

CONCEPTO DE VIDA REMANENTE Y REHABILITACIÓN



ABET	K	H
	80	20

Logros:

Comprende la finalidad del adecuado diseño de las estructuras de los pavimentos y los requerimientos de los espesores de sus diferentes capas. Contrasta gráficamente la pérdida de servicio o condición del pavimento. Comprende el por qué de la degradación de los pavimentos, contrastando su deterioro a lo largo de los años y evaluando la influencia de las diferentes actividades desarrolladas en la ejecución de un proyecto.

TEMARIO:

- Condición y serviciabilidad del pavimento
- Vida remanente y rehabilitación
- Teoría, instrumento y realidad de la evaluación
- Causas de degradación del pavimento

INTRODUCCIÓN

Los proyectos deberán basarse en una completa comprensión del estado situacional de la vía que se requiere intervenir. Para ello, se tendrá muy claro la finalidad del diseño de la estructura del pavimento, poniendo énfasis en los requerimientos de los espesores de las diferentes capas que lo conforman y del pleno control del deterioro de la estructura a lo largo de los años de vida de servicio propuesto.

Internet presenta información sobre la Red Vial Nacional⁴, de la cual se puede evaluar en qué estado se encuentra, según los tipos y niveles de vías existentes. Sin embargo, las características proporcionadas se orientan exclusivamente a la parte socioeconómica y no se presenta otras características técnicas como: la calidad de los suelos en la carretera evaluada; el sectorizado; el clima; la calidad, ubicación y estado de explotación de las canteras; entre otros detalles de utilidad para el diseñador con fines de rehabilitación.

La evaluación de los pavimentos puede considerar la variación del Índice de Serviciabilidad Presente (PSI) comparada con el tiempo de servicio del pavimento. El PSI depende de la rugosidad de la superficie del pavimento y esta se puede medir con equipos sofisticados o con equipos más al alcance del diseñador, como el Merlin, o el Bump Integrator. Este último equipo permite evaluar la totalidad de la carretera con mayor precisión y rendimiento, en oposición a lo determinado por el Merlin. Sin embargo, ninguno será realmente útil si no existe la adecuada calibración. Hoy, se cuenta con equipos de mayor eficiencia para estas mediciones.

Por otro lado, para las condiciones que presentan la superficie de los pavimentos, se realizan los relevamientos de fallas, de los cuales el Índice de la Condición del Pavimento (PCI)⁵ permite una evaluación más completa ya que corresponde a un método cualitativo y cuantitativo muy útil para los metrados y determinación del presupuesto de obra. Si bien es cierto hoy es sugerido su empleo por el MTC. En 1990 fue empleado para evaluar la carretera Panamericana Sur en su totalidad, proporcionando resultados que no demandó adicionales en los presupuestos de rehabilitación. Este método, frente a los recomendados por el MTC, permite evaluar el concepto de vida remanente y rehabilitación, además de determinar la frecuencia de evaluación necesaria para carreteras de diferentes categorías, según su prioridad y tiempo de servicio.

⁴ Cfr.: Provías Nacional

⁵ Cfr.: Reporte Técnico TM 5-623, USACE

2.1 CONDICIÓN Y SERVICIABILIDAD DEL PAVIMENTO

Los trabajos de mantenimiento y rehabilitación (M&R) se basan en los valores de PCI o PSI, para los cuales se evalúan la trayectoria de degradación que puede presentar el pavimento a lo largo del tiempo de servicio. La Figura 2.1 presenta la forma de degradación de una estructura de pavimento que fue diseñada según la trayectoria de línea continua. Se entiende que la línea correspondiente a un diseño sobredimensionado no causa mayor problema ya que se tendrá una obra generosa al durar más del tiempo previsto. Sin embargo, la línea entrecortada correspondiente a una estructura infradiseñada sí genera un serio problema, ya que se tendrá una estructura de pavimento que no alcanzará el tiempo de diseño y por lo tanto deberá ser tratado mediante actividades de M&R antes de cumplir el tiempo de servicio.

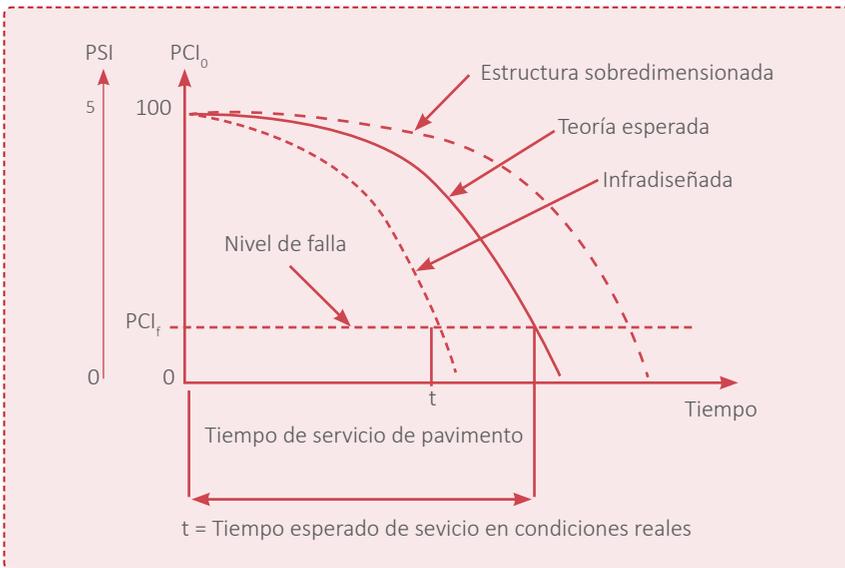


Figura 2.1 Situaciones de degradación del pavimento

Fuente: El autor.

Para determinar la tendencia de la degradación del pavimento, ya sea por PCI o por PSI, se deberá ejecutar trabajos de mediciones periódicas que permitan plotear la gráfica y evaluar la tendencia del pavimento frente al tiempo de servicio que brindará. La Figura 2.2 presenta recomendaciones para ejecutar este trabajo en función de la categoría de la carretera en cuestión, asociada a un nivel de prioridad.



Figura 2.2 Frecuencia de evaluación de pavimentos

Fuente: PCI, Jugo Burguera

La tabla 2.1 determina el tiempo recomendable para efectuar los trabajos de evaluación en función al nivel determinado anteriormente. Se aprecia las carreteras de primera categoría, intermedias y caminos rurales.

Tabla 2.1 Frecuencia de evaluación del pavimento

Nivel de prioridad	Frecuencia de evaluación (años)		
	Tipo de vía		
	Primaria	Secundaria	Terciaria
1	0.5	1	1
2	1	1	2
3	1	2	3

Fuente: PCI, Jugo Burguera.

2.2 VIDA REMANENTE Y REHABILITACIÓN

Se hallan los valores de PCI, calculados a partir de la información obtenida de una inspección visual. Se podrá definir las actividades y sus prioridades de mantenimiento y reparación. La Figura 2.3 muestra como al realizar una medida de mantenimiento y rehabilitación (M&R), el valor de PCI se incrementa a la posición de PCI(d), modificando la trayectoria que sigue la degradación y aumentando el tiempo de servicio.

Para un tiempo t de servicio, las actividades de M&R, que elevan el valor del PCI, propicia un tiempo de servicio añadido (VRE (+)). Estas actividades de M&R pueden darse tanto para alargar el tiempo de servicio del pavimento, como para corregir el tiempo para el cual fue diseñado inicialmente.

El proceso de degradación del pavimento presenta una trayectoria que al final coincide con el valor de PCI final (PCI_f) en un nivel que no llega a la destrucción total de la estructura. Este nivel de falla puede ser el requerido en los términos de referencia del MTC, pero lo más importante radica en que la curva intercepta a este nivel para un tiempo igual al del diseño e igual a $(nt + nx(VRE))$.

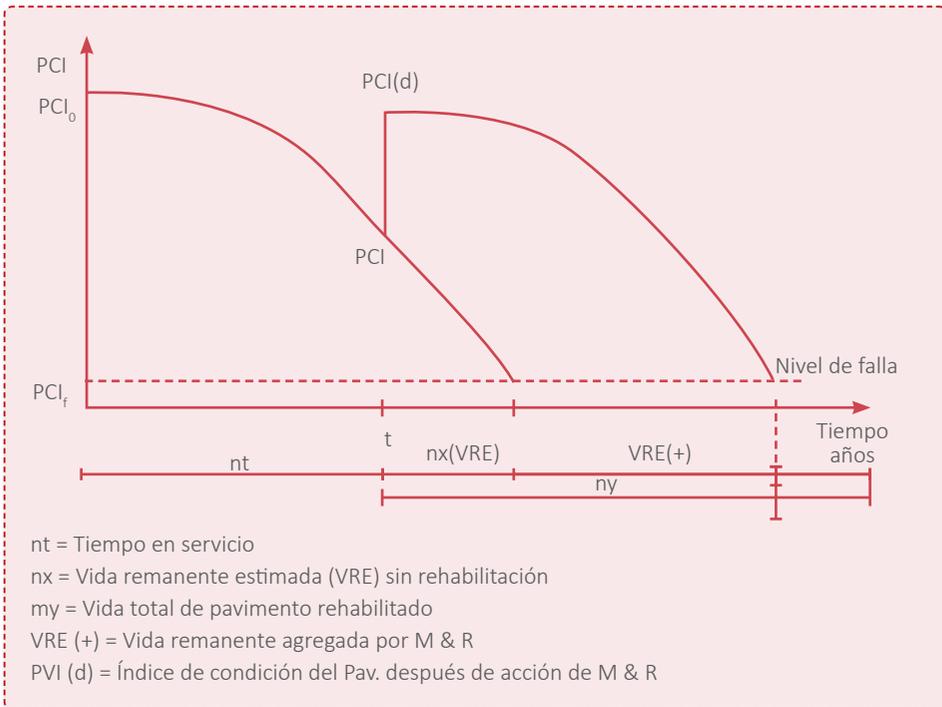


Figura 2.3 Concepto de vida remanente

Fuente: Jugo Burguera.

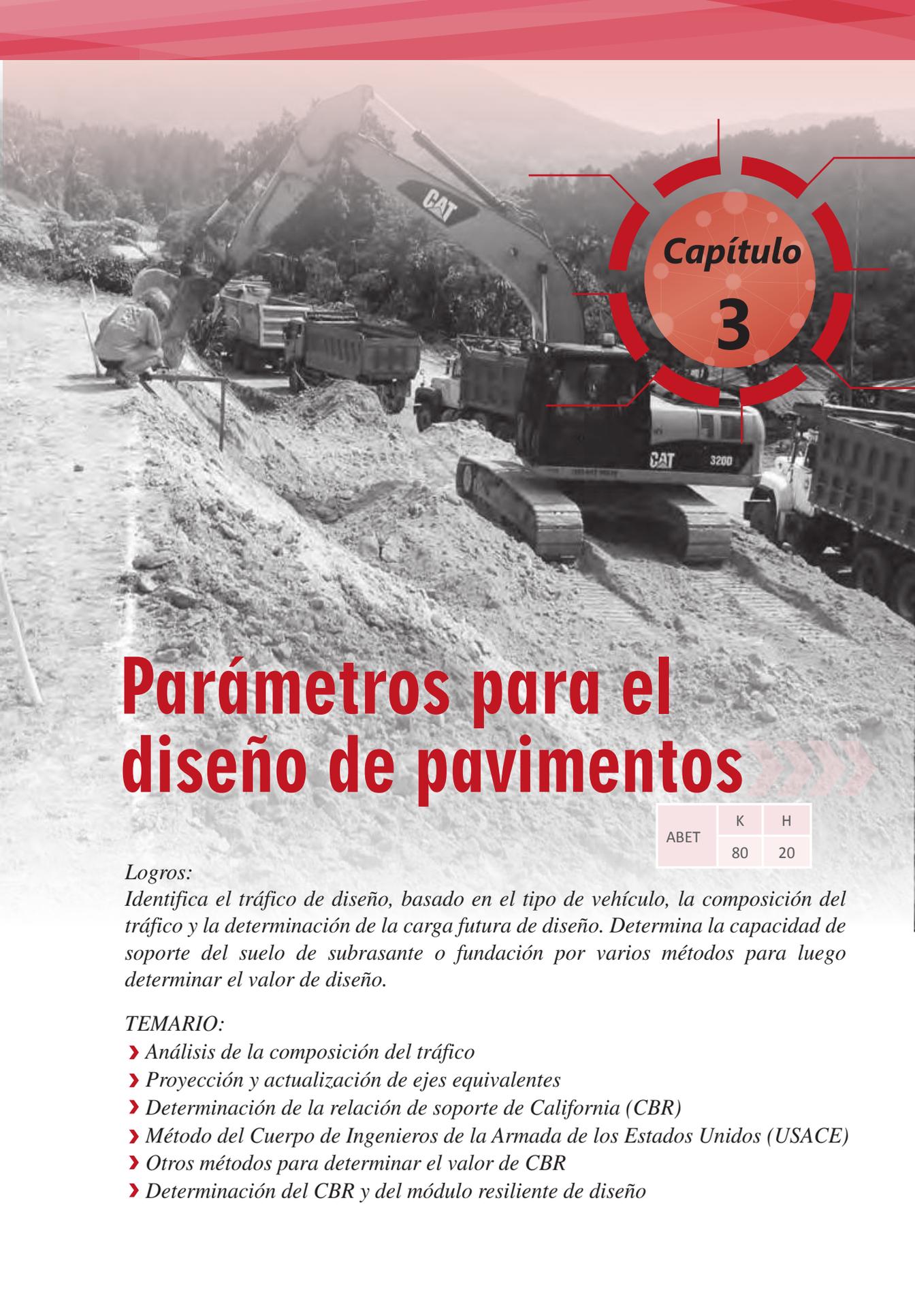
2.3 CAUSAS DE DEGRADACIÓN DEL PAVIMENTO

Las causas que generan la degradación de los pavimentos son variadas, sin embargo se rescatan aquellas que responden a una influencia directa que afecta la estructura, desde el inicio al tiempo de servicio. Esta degradación se presenta por diferentes causas, como lo muestra la Tabla 2.2, en la cual se señala algunas de las razones por la cual se consigue una trayectoria de degradación de un pavimento infradiseñado, que no alcanzará el tiempo de servicio de diseño.

Tabla 2.2 Causas de fallas de un pavimento

Causa	Efecto	Comentario
Tráfico	Infradiseño	Cargas reales diferentes a las previstas en el diseño.
Proceso constructivo	Estructura débil	Inadecuados: espesores, mezclas y estabilización, deficiencia en distribución y compactación.
Deficiencias de proyecto	Antieconómica	Diseños inadecuados, mala valoración de subrasante, inadecuada dosificación de la mezcla y no consideración del factor ambiental.
Factores ambientales	Vida útil	Elevación de napa freática, inundaciones, lluvias prolongadas, insuficiencia en drenaje superficial o profundo, variación térmica, congelamiento, sales nocivas.
Deficiente mantenimiento	Pronta rehabilitación	Técnicas inadecuadas, falta de conservación.

Fuente: El autor.



Capítulo

3

Parámetros para el diseño de pavimentos

ABET	K	H
	80	20

Logros:

Identifica el tráfico de diseño, basado en el tipo de vehículo, la composición del tráfico y la determinación de la carga futura de diseño. Determina la capacidad de soporte del suelo de subrasante o fundación por varios métodos para luego determinar el valor de diseño.

TEMARIO:

- Análisis de la composición del tráfico
- Proyección y actualización de ejes equivalentes
- Determinación de la relación de soporte de California (CBR)
- Método del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (USACE)
- Otros métodos para determinar el valor de CBR
- Determinación del CBR y del módulo resiliente de diseño

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los expedientes técnicos no se integran las informaciones obtenidas del estudio de tráfico como de la evaluación de los suelos, de una manera coherente que permita la toma de decisiones. La respuesta de los suelos frente a estas cargas se refleja en la etapa de diseño en gabinete. Sin embargo, se asocian solo como insumos de diseño, más no como interacción de ambas variables.

El tiempo dedicado a elaborar el estudio de tráfico, así como la época en que se realiza, se ven restringidos por los tiempos disponibles contractualmente, haciendo que no sean los más reales que se quisieran, y su proyección aún más incierta. Estos trabajos están orientados a identificar la composición del tráfico, su volumen y la determinación de la carga futura que soportará la vía a diseñar. Sin embargo, no se evalúa la interacción de estas cargas frente a las características físicas y mecánicas de los suelos y su comportamiento a largo plazo. Las dimensiones y cargas de los vehículos están normados para ser tomados en todo tipo de evaluación.⁶

Los trabajos relacionados al comportamiento de los suelos no son tomados en cuenta para una evaluación completa de la transmisión de cargas a las masas de suelos; solo se basan en la determinación de la capacidad de carga como insumo de diseño, dejando de lado los problemas de deformación a lo largo del tiempo y solo evaluando la estabilidad de los suelos y cargas.

En la mayoría de los casos se evalúan una gran cantidad de suelos, tanto en el campo como en el laboratorio, que sirven solo para aumentar el volumen de los anexos presentados al MTC. Lo conveniente sería el proceso de la información de los suelos evaluados mediante interpretación de resultados, elaboración de tablas estadísticas, con eliminación de valores incoherentes, determinación de valores representativos o característicos de los materiales, su posterior empleo en los diseños, entre otros.

Tanto los ensayos como sus resultados deben ser contrastados con las exigencias según su uso o para establecer las condiciones de obra.⁷ Estos ensayos deben permitir modelar a los suelos en toda la longitud de la carretera. La vía se debe sectorizar según las propiedades físicas y mecánicas de los suelos.

⁶ Cfr.: Normas Legales, diario El Peruano, setiembre de 1998

⁷ Cfr.: Especificaciones Técnicas para la Construcción de Carreteras, MTC

3.1 ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN DEL TRÁFICO

El tráfico, como número de ejes equivalentes acumulados (N), corresponde a uno de los insumos más importantes para el diseño de pavimentos. Se puede diferenciar dos etapas, aquella que desarrolla el especialista en estudios de tráfico y otra desarrollada por el ingeniero de pavimentos.

Los trabajos del especialista en tráfico son lo bastante profundo que demanda un adecuado análisis para encontrar los factores que ayuden a determinar el valor proyectado. En una primera etapa se define la composición del tráfico, es decir, los tipos de vehículos que forman el conjunto de usuarios de la vía evaluada. En función a los trabajos de brigadas de conteo distribuidas en lugares estratégicos de la vía, se determina el número de vehículos que pasan y corresponden a cada tipo, lo que conformaría el volumen o el índice medio diario (IMD) por tipo de vehículo.

3.1.1 PROYECCIÓN DE EJES EQUIVALENTES

Los datos recopilados tal como se presentan no pueden ser integrados ni procesados porque corresponden a características diferentes. Para integrar los datos, se requiere de una normalización de la carga, especialmente a la carga del eje estándar que corresponde a 8.2 t o 18 000 lb o 18 kip. Luego se debe encontrar un factor de correspondencia entre el peso real del vehículo y el eje estándar, llamado comúnmente factor destructivo. Este factor destructivo relaciona las veces que pasa un vehículo pesado en números de veces equivalentes al eje estándar. Luego, el producto del número de vehículos o IMD multiplicado por el factor de equivalencia de ejes o factor destructivo normaliza el tráfico a ejes equivalentes que podrán ser operados aritméticamente.

Este trabajo corresponde a un momento dado en el tiempo y para trasladarlo al futuro o proyectarlo, se tendrá que recomendar la tasa anual de crecimiento de los vehículos o de los ejes equivalentes. Esta tasa de crecimiento podrá ser un único valor o tener varios valores, para cada tipo de vehículo, e inclusive en algunos casos se presentan tasas para cada periodo de años, haciendo la estimación del tráfico proyectado más engorroso.

La proyección de los ejes equivalentes acumulados, durante el tiempo de vida de servicio estimado para el diseño del pavimento, se calculará teniendo en cuenta el número de repeticiones de ejes equivalentes, para un solo sentido, en un periodo de vida útil de (n) años y una tasa de crecimiento (r). Se calcula con la expresión siguiente:

$$N = \frac{365}{2} [IMD_{om} \cdot Fd_{om} + IMD_{2e} \cdot Fd_{2e} + IMD_{3e} \cdot Fd_{3e} + IMD_t \cdot Fd_t] \left[\frac{(1+r)^n - 1}{r} \right]$$

Donde:

- N = Número de ejes equivalentes acumulados
- IMD = Índice medio diario
- FD = Factor destructivo
- r = Tasa de crecimiento
- n = Periodo de diseño
- om = Ómnibus
- 2e = Camión de 2 ejes
- 3e = Camión de 3 ejes
- t = Tráiler y semitráiler

Como se puede apreciar, a mayores variables, mayor incertidumbre. Un caso especial se presenta en las carreteras de frontera, ya que presentan problemas de comunicación entre cargas de otros países que tienen diferentes tonelajes, pero que emplea la vía. El tiempo real a proyectar debe comprender el tiempo en que se desarrolla el proyecto y la obra, ya que el tiempo requerido será el de servicio, es decir, desde el primer día que se usa la vía y desde ese momento debe durar el tiempo de diseño o servicio requerido.

3.1.2 ACTUALIZACIÓN DE EJES EQUIVALENTES

En algunos casos se deberá efectuar la actualización del tráfico, especialmente cuando se realizan proyectos que no contemplan el estudio de tráfico y sugieren que se emplee alguno de referencia. La actualización se podrá calcular con la expresión siguiente:

$$EE_{act} = EE_{ref} \cdot (1+r)^n$$

La Tabla 3.1 muestra un ejemplo de los valores referenciales que permiten una rápida interpretación de los pasos a seguir en la estimación del tráfico de diseño.

Tabla 3.1 Estimación de tráfico proyectado (N)

Valor N de EJES PROYECTADOS								
PROYECTO:								
DETALLE:								
Año de la evaluación del tráfico		2001		años de trámites		2.0		
Año de la elaboración del estudio		2006		al 1.º año de servicio		2008		
Detalle	Ligeros	Ómnibus	C2	C3	ST y T	IMD acum.		
IMD _i		73.0	466.0	88.0	19.0	6.46		
FD _i		2.30	2.70	4.80	10.70			
Ejes equivalentes		EE (2001) = IMD _i * Fdi					IMD acum.	
EE al 2001		0.0	167.9	1,258.2	422.4	203.3	2,052	
Tasas (r)		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	
Actualización		EE (2006) = EE (2001) * (1 + r) ^ n					IMD acum.	
EE al 2006		0.0	209.2	1,567.9	526.4	253.3	2,557	
Servicio	Año (i)	N = 365/2 * (EE 2006) * ((1 + r) ^ n - 1) / LN (1 + r)						
0	2008	0.0	78,088.7	585,177.1	196,454.3	94,552.9	954,273	
1	2009	0.0	119,787.9	897,660.2	301,360.4	145,044.0	1,463,853	
2	2010	0.0	163,363.6	1,224,205.1	410,987.3	197,807.1	1,996,363	
3	2011	0.0	208,900.1	1,565,444.5	525,547.4	252,944.6	2,552,837	
4	2012	0.0	256,485.8	1,922,039.7	645,262.7	310,563.2	3,134,351	
5	2013	0.0	306,212.9	2,294,681.6	770,365.2	370,774.7	3,742,034	
6	2014	0.0	358,177.7	2,684,092.5	901,097.3	433,695.8	4,377,063	
7	2015	0.0	412,480.8	3,091,026.8	1,037,712.4	499,448.2	5,040,668	
8	2016	0.0	412,480.8	3,091,026.8	1,037,712.4	499,448.2	5,040,668	
9	2017	0.0	528,528.1	3,960,655.6	1,329,662.2	639,962.9	6,458,809	
10	2018	0.0	590,497.1	4,425,035.3	1,485,562.6	714,997.4	7,216,092	
11	2019	0.0	655,254.6	4,910,312.0	1,648,478.6	793,408.4	8,007,454	
12	2020	0.0	722,926.3	5,417,426.2	1,818,725.8	875,347.9	8,834,426	
13	2021	0.0	793,643.2	5,947,360.6	1,996,634.2	960,974.7	9,698,613	
14	2022	0.0	867,542.3	6,501,142.0	2,182,548.4	1,050,454.7	10,601,687	
15	2023	0.0	944,766.9	7,079,843.5	2,376,828.7	1,143,961.4	11,545,401	
16	2024	0.0	1,025,466.6	7,684,586.7	2,579,851.7	1,241,675.8	12,531,581	
17	2025	0.0	1,109,797.8	8,316,543.2	2,792,010.7	1,343,787.3	13,562,139	
18	2026	0.0	1,197,923.9	8,976,937.8	3,013,716.8	1,450,493.9	14,639,073	
19	2027	0.0	1,290,015.7	9,667,050.2	3,245,399.8	1,562,002.3	15,764,468	
20	2028	0.0	1,386,251.6	10,388,217.6	3,487,508.4	1,678,528.6	16,940,506	

Fuente: El autor.

3.2 CAPACIDAD DE SOPORTE DE LA SUBRASANTE

La determinación de la capacidad de soporte de los suelos responde a la realización de ensayos sujetos a las recomendaciones de las normas de uso general⁸. La determinación del valor de CBR se realiza de acuerdo a las recomendaciones de las referencias que requieren de los resultados del ensayo de Proctor para hallar el CBR a una determinada densidad. Sin embargo, el requerimiento para determinar la estructura del pavimento demanda la determinación del valor del módulo resiliente, ensayos que en la mayoría de los laboratorios no cuentan con el equipo necesario para su ejecución. Solo el Laboratorio de la Oficina de Apoyo Tecnológico (OAT) del MTC cuenta con el equipo especial, pero poco se ha realizado como investigación. Uno de los trabajos de investigación del Laboratorio de Suelos de la UNI correlacionó estos valores empleando el equipo triaxial dinámico del Laboratorio Geotécnico del CISMID⁹.

La escasez de equipos idóneos ha permitido emplear las correlaciones existentes entre CBR y el Mr de los suelos, para lo cual debido a diferentes trabajos de investigación, se han referido a más de tres decenas de fórmulas, aparte de las recomendadas por la AASHTO 93. El problema que actualmente se presenta es la falta de correspondencia entre los ensayos y la realidad.

Mientras que los trabajos se presenten en zonas áridas o de baja precipitación, los valores de la compactación del Proctor y la determinación del valor de CBR cumplen, porque la cantidad óptima de agua (OCH) se logra añadiendo agua a la muestra. Sin embargo, en zonas de la selva alta y selva baja, en donde la humedad natural del suelo supera al OCH, el proceso de compactación del Proctor no se cumple y por lo tanto el CBR es un valor forzado que no guarda correspondencia con la realidad. En las vías de penetración, los problemas se acrecientan aún más, para lo cual se deberá emplear extensiones del ensayo u otras metodologías que infieran valores semejantes de soporte y valores de CBR de diseño, inadecuados y por consiguiente originan número estructural (SN) y capas de pavimento también inadecuadas.

⁸ Cfr.: ASTM D1883; MTC EG-2000; AASHTO T-193

⁹ Cfr.: W. Gutiérrez, M. Limaymanta, 2005

A partir de la determinación del CBR, se evalúa el método sugerido por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (USACE), que permite determinar la variación del CBR versus la densidad seca del suelo, evaluando las densidades en el campo e ingresando a la gráfica para hallar el valor de CBR puntual de una calicata sin asociar la profundidad. Luego del análisis de todos los valores obtenidos, se debe definir cuál es el diseño y mediante qué método se podrá determinar.

Los trabajos demandan un tiempo que excede largamente al dispuesto por el MTC, para el desarrollo del proyecto, para lo cual se debe emplear correlaciones obtenidas con equipos alternativos como el penetrómetro dinámico de cono (PDC). El tamaño de muestra será mucho mayor y se podrá emplear la estadística clásica para determinar el valor de diseño. En el mejor de los casos y si el tiempo y el presupuesto lo permiten se podrá realizar ensayos de CBR *in situ*¹⁰.

Otros de los problemas que se presentan es la profundidad adecuada en la cual se debe determinar el valor de soporte asociado a un punto de evaluación o calicata de exploración. Luego, es conveniente evaluar la transmisión de esfuerzos en una masa de suelo, basada en la teoría de Boussinesq y la elaboración del bulbo de presión para la determinación de las isóbaras.

3.2.1 UTILIDAD DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO

Los trabajos de campo demandan actividades organizadas para ser desarrolladas en el menor tiempo posible, ya que la siguiente etapa que corresponde a los trabajos de laboratorio es más extensa y de cuyos resultados dependen los diseños finales.

En las vías de transportes, las actividades de exploración de campo se reduce a la ejecución de calicatas de profundidades que, en la mayoría de los casos, no van más allá de los 2.0 m. Estas excavaciones permiten realizar el logeo y definir estratos de comportamiento homogéneo. Estos trabajos traducidos en perfiles estratigráficos generan horizontes de materiales similares, a lo cual se infiere propiedades físicas también similares.

¹⁰ Cfr.: Carretera Iquitos- Nauta, Tramo 4

Durante esta etapa se realizan los trabajos de campo mínimo necesarios que sean posible, pero, en realidad, la mayoría se limita a la toma de muestra para desarrollar trabajos en el laboratorio. Un trabajo más interesante e importante está referido a la determinación de valores característicos que permitan alcanzar el objetivo propuesto considerando las actividades siguientes:

- Sectorizar la vía empleando la información de las características de los suelos.
- Determinar el valor de diseño que caracteriza al material predominante de la subrasante.
- Definir la profundidad característica del tramo evaluado.

El trazado de una línea imaginaria, que permita realizar las evaluaciones comentadas, estará en función de que los suelos permanezcan luego de efectuarse los trabajos de corte en la partida de movimiento de tierra y por otro lado asegurar que a esta profundidad los suelos aún se encuentren sensibles a los esfuerzos transmitidos por las cargas, para de esa forma tener un buen valor de diseño.

3.2.2 CAPACIDAD DE SOPORTE DE DISEÑO

En la mayoría de los casos, la determinación de la capacidad de carga de la subrasante (CBR) con fines de diseño se ajustan a las recomendaciones de las normas.

Como es sabido, a este ensayo de CBR le antecede otro que permite determinar la máxima densidad para un contenido de humedad que se hace óptimo (OCH); el ensayo de Proctor permite extraer el máximo provecho de estabilización del suelo, brindando menor relación de vacíos, máxima densidad, mayor resistencia, baja permeabilidad, mayor grado de compactación, entre otras características.

A diferencia del ensayo de Proctor, que también es un proceso de compactación, el CBR evalúa la resistencia al esfuerzo cortante de la muestra en la zona de linealidad, es decir sin llegar a la zona plástica y menos aún a la falla. Luego compara los esfuerzos a una determinada penetración con una muestra patrón de piedra calcárea chancada y cuya relación o número de CBR se asocia al porcentaje correspondiente.

El proceso de laboratorio se extrapola al campo, ejecutándose trabajos de movimiento de tierra; en el cual se añade agua al terreno mediante cisterna, luego se uniformiza o mezcla con la moto-niveladora y finalmente se compacta con rodillo y se afina con rodillo neumático.

El proceso se cumple sin inconvenientes en suelos con humedades menores al OCH. Tal es el caso de la mayoría de los suelos de la costa. Sin embargo, los suelos en el territorio nacional presentan variados contenidos de humedades. En zonas de precipitaciones continuas e intensas y suelos con baja capacidad drenante, se puede afirmar que estos siempre permanecerán húmedos superando los óptimos contenidos de humedad hallados en el laboratorio. Por lo tanto, el proceso descrito anteriormente, según la norma del ensayo de Proctor, queda sin sentido en su aplicación. En esta etapa se registra una falta de relación entre los trabajos de campo y el laboratorio y también entre sus profesionales responsables. Si los suelos presentan humedades mayores a las necesarios, no se podrá alcanzar las densidades máximas calculadas en el laboratorio y menos sentido tendrá entonces el valor de CBR hallado en laboratorio, ya que no es representativo con lo que realmente ocurre en el campo y mal se haría en tomar este valor como diseño de la estructura del pavimento.

Las diferentes humedades naturales de los suelos generan diferentes densidades tanto para una misma calicata con diferentes estratos como para varias calicatas evaluadas a lo largo de la vía.

Estos casos se afrontan con la ampliación del ensayo de CBR, en el cual se hace variar la energía de compactación del suelo, determinándose diferentes densidades. La Figura 3.1 muestra la variación de la energía de compactación en tres ocasiones que permiten elaborar una curva de CBR versus la densidad seca de los suelos. A esta curva se podrá ingresar con la densidad natural de campo de una progresiva determinada y obtener el correspondiente valor de CBR.

Surge la pregunta, ¿a qué profundidad debe tomarse la densidad para correlacionar el valor de CBR en la gráfica descrita anteriormente? Se requiere realizar un trabajo homogéneo en la toma de valores con fines de diseño, es decir, se debe uniformizar la profundidad a la cual se deberá tomar los valores representativos de diseño para luego integrarlos, mediante la estadística clásica, y obtener de esta manera el valor final para el cálculo de la estructura del pavimento.

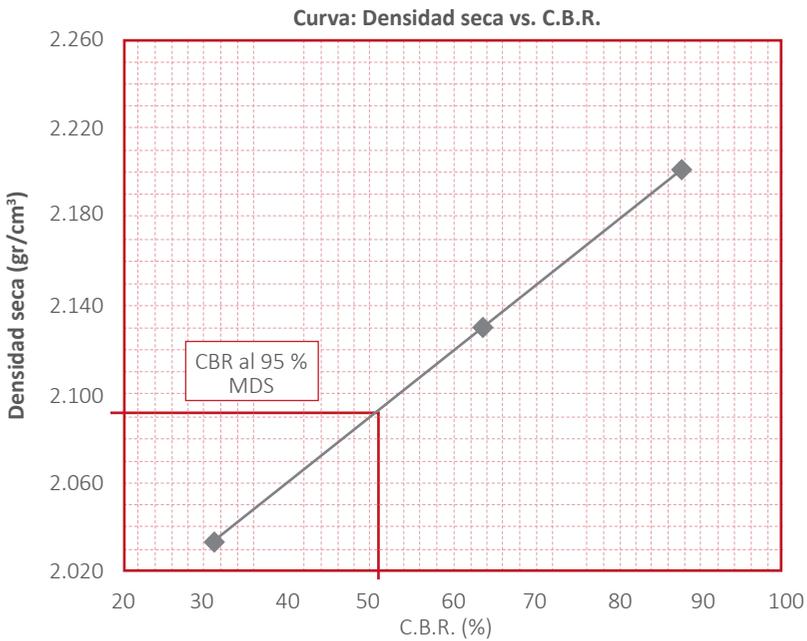
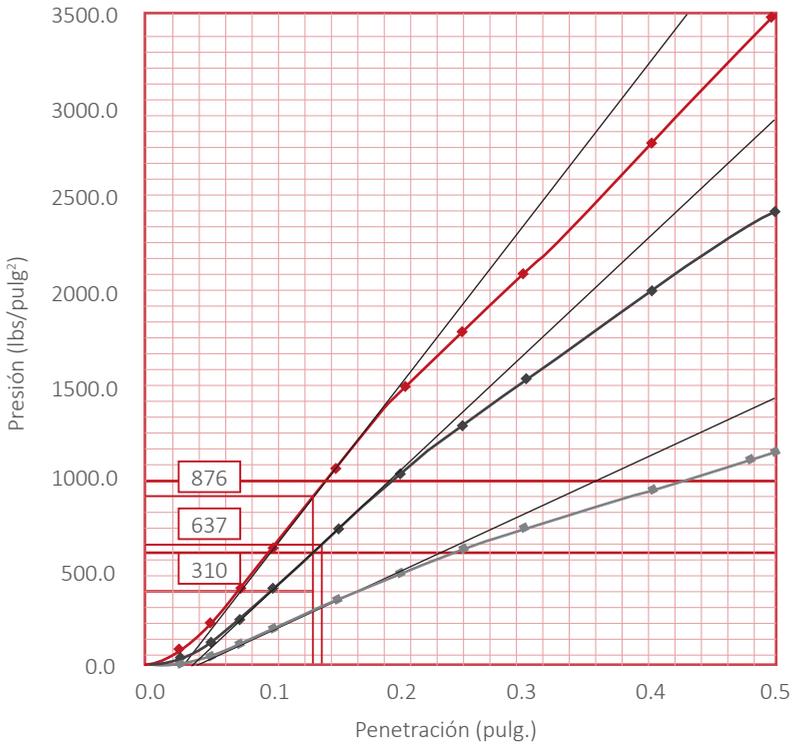


Figura 3.1 Curva de CBR sugerida por la USACE

Fuente: El autor.

De acuerdo a la teoría de transmisión de los esfuerzos en una masa de suelo,¹¹ se puede realizar una primera estimación en la cual se determine el bulbo de presiones. Se aprecia que, al evaluar la forma como se atenúa la carga proveniente del eje equivalente a lo largo de la profundidad, se observa que a los 0.7 m se presenta aún el 80 % de la carga. Esta profundidad se encuentra alejada de las posibles alteraciones por los movimientos de la tierra y mantiene la sensibilidad a la carga solicitada. La Figura 3.2 muestra detalles de la forma sugerida para establecer sectores en la vía que permita un análisis particularizado.

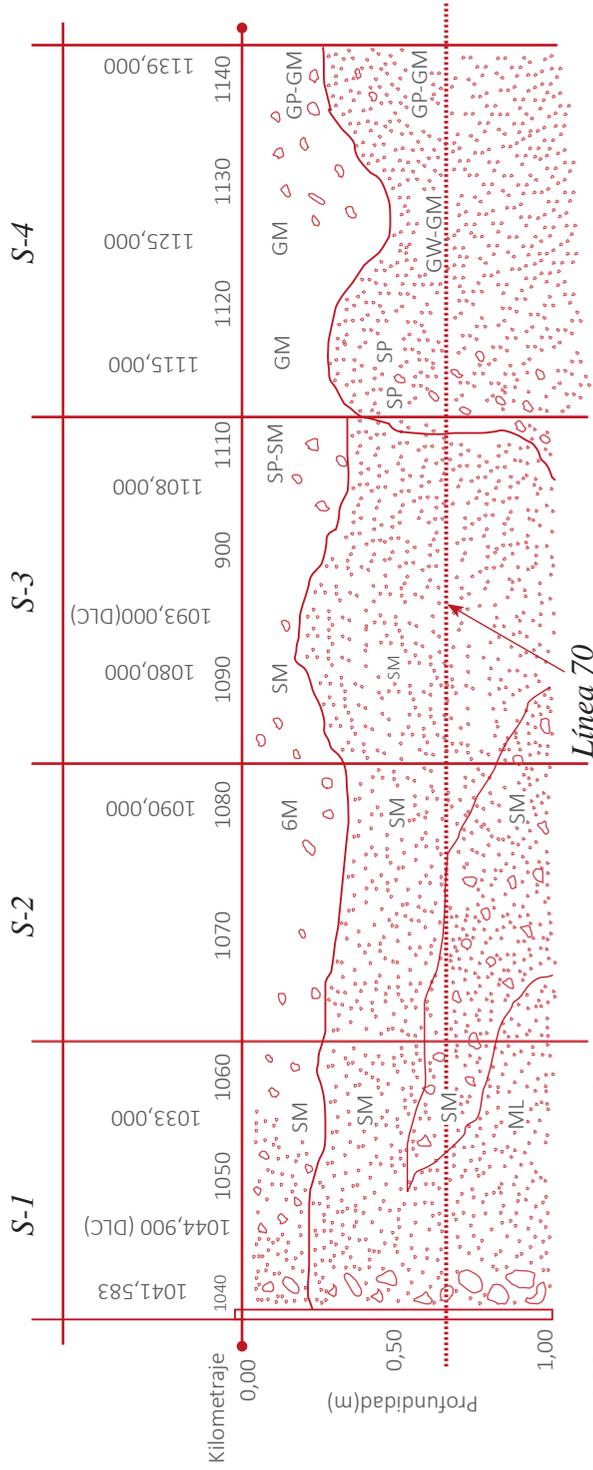


Figura 3.2 Determinación de la Línea 70, para el sectorizado

Fuente: El autor

¹¹ Cfr.: Juárez Bacillo Tomo II

En este caso, se recomienda un proceso para la determinación de la capacidad de carga o CBR de diseño, mediante el método de la Línea 70,¹² atendiendo a los pasos siguientes:

1. Determinar el eje del trazo de la vía a proyectar.
2. Espaciar las calicatas de acuerdo a los términos de referencia u otro espaciamiento definido por el profesional responsable.
3. Realizar las excavaciones a cielo abierto hasta la profundidad mínima de 1.5 m por debajo de la cota de rasante, pudiendo requerir mayores profundidades de excavación. Mejor si se determina el bulbo de presiones y se determina la profundidad de excavación de acuerdo al tipo de suelos. Se puede comprobar que para suelos puramente cohesivos la carga se atenúa al 10 % a 1.90 m de profundidad, lo cual supera los 1.5 m de exploración para suelos friccionantes tradicionalmente empleados.
4. Integrar los registros de excavación ejecutados mediante el perfil estratigráfico de la vía en proyecto.
5. Trazar la línea imaginaria a 70 cm de profundidad, desde la cota de rasante o de nivelación del terreno que recibirá la estructura del futuro pavimento, observando y analizando los suelos por debajo de ella, que comprenda espesores mínimos de 25 cm para ser considerado como suelo representativo.
6. Sectorizar la vía en función a la homogeneidad de los suelos que cruza esta línea.
7. Determinar el CBR de diseño para cada sector mediante un proceso estadístico de percentil, aplicando el porcentaje recomendado según la importancia de la vía.

3.2.3 CORRELACIÓN ENTRE EL PDC Y CBR

Debido al elevado número de muestras obtenidas en el trabajo de campo, el tiempo necesario para ensayarlas y hallar los valores de CBR en laboratorio supera al disponible para elaborar el estudio completo. En algunos casos, la logística para el transporte de muchos kilos de muestras agrava más la condición de tiempo disponible para obtener resultados.

Se requiere de trabajos alternativos que determinen resultados de CBR en mayor cantidad pero en el menor tiempo posible y que luego se infiera el valor real de capacidad de soporte.

¹² Método propuesto por el autor

El valor de diseño de CBR es producto de un proceso de percentil y depende del tamaño de la muestra. Entonces, previa calibración con el ensayo tradicional de laboratorio, se puede emplear el equipo penetrómetro dinámico de cono (PDC) y la fórmula que se presenta a continuación:

$$\text{CBR} = 4.385 (\text{PDC})^{-1.264}$$

Esta fórmula propuesta por el MTC¹³ presenta el número de PDC correspondiente a la pendiente de la recta determinada en el ensayo de penetración dinámico y que debe integrar los valores que pertenezcan a un mismo suelo.

La Figura 3.3 presenta dos formas de reportar el ensayo de PDC con fines de determinar el valor de CBR en una misma calicata. Lo importante es definir los estratos participantes en una excavación y luego agrupar los datos correspondientes al mismo suelo mediante la recta que los integra.

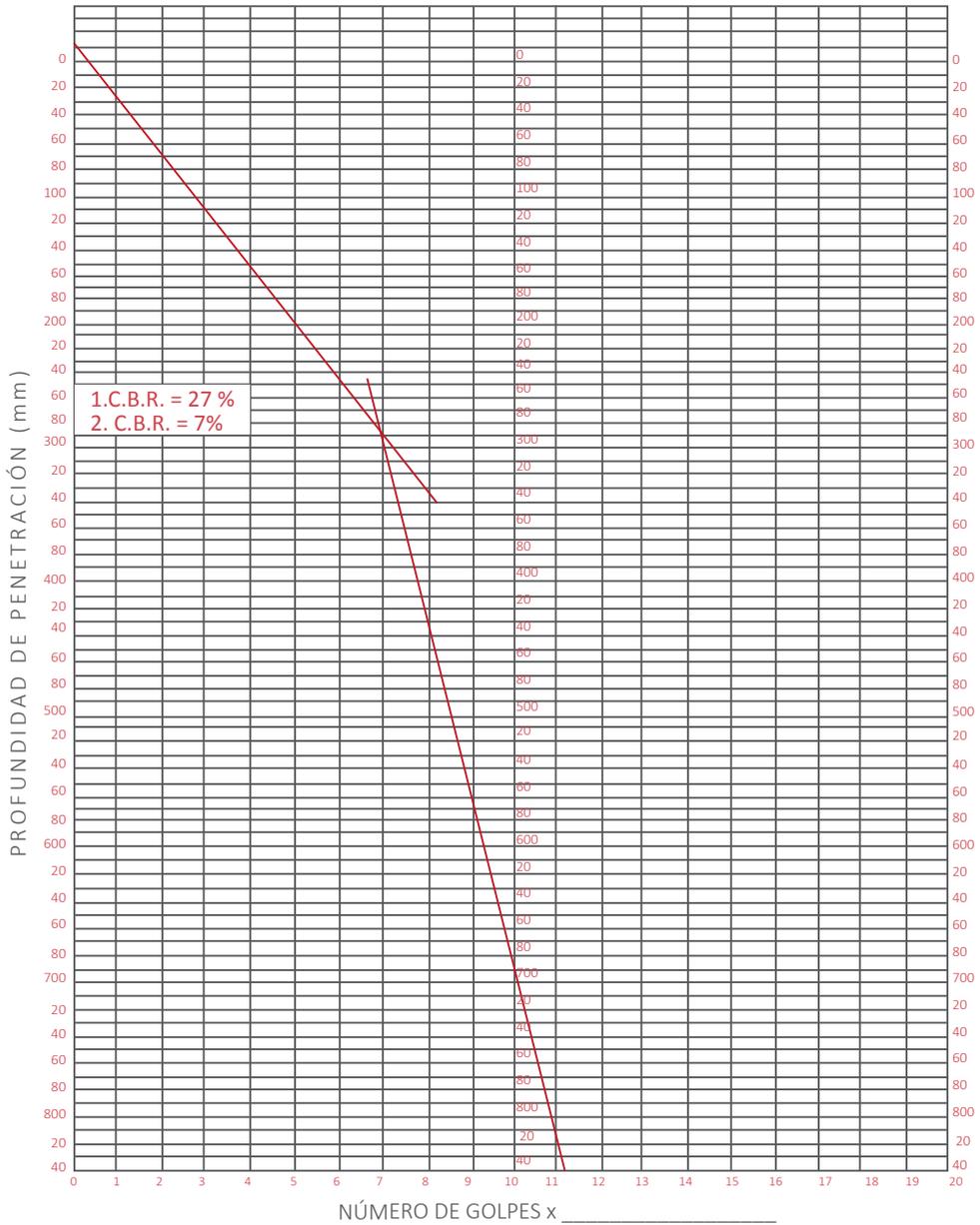
Posteriormente, se determinará la pendiente de la recta que representará al valor de PDC y que será afectado por la expresión indicada. El primer formato corresponde al empleado por el MTC y el segundo es una elaboración propia para trabajos, desarrollado para Ferrocarril Central Andino (FCCA) en diciembre del 2001.

La fórmula corresponde a una propuesta para hallar el CBR ponderado por calicata, basado en una gran cantidad de datos, pero, como se mencionó anteriormente, solo para la obtención de valores inferidos y hallados indirectamente.

¹³ Cfr.: Herrera – García; MTC

PENETRÓMERO DINÁMICO DE CONO

PROYECTO: PANAMERICANA SUR GRUPO IV SECTOR: KM. 1040-KM.1140
 UBICACIÓN: KM. 1055-M-2 LADO: cm del eje LÍNEA CONO DE 60° CBR^{438.5(DCP)}-1.264
 FISURACIÓN E M S AMUELLAMIENTO:.....mm. TIPO DE RODADURA:..... ESPESOR:.....
 EXPLANACIÓN: CORTE / RELLENO / MEDIA LADERA R DRENAJE: SUPERFICIAL: R M PROFUNDO: R M
 OBSERVACIONES Se comenzó P.D.C a 40 cm

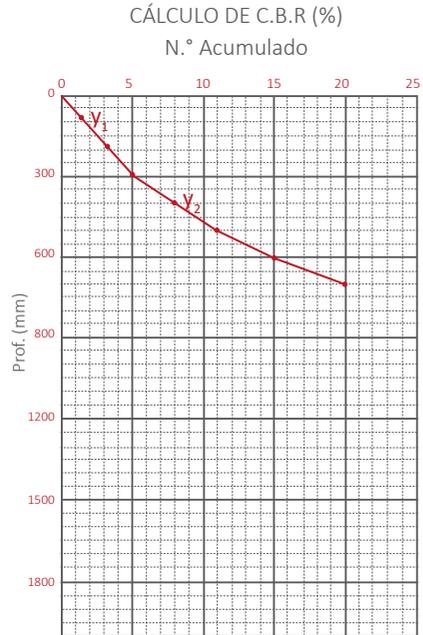


CÁLCULO DE CBR A PARTIR DEL PDC

Prog. (km): 11 + 400
 Profundidad (m): 0.90

Calicata:

DATOS DE CAMPO (m)				Yi Prof. (mm)		N (golpes)	Xi Golpes Acumulado
No	Estratos	de	a	de	a		
1	ML	0.0	0.1	0	100	1	1
2	3.2	0.1	0.2	100	200	2	3
3		0.2	0.3	200	300	2	5
4	SM	0.3	0.4	300	400	3	8
5		0.4	0.5	400	500	3	11
6	8.3	0.5	0.6	500	600	4	15
7		0.6	0.7	600	700	5	20
8		0.7	0.8	700	800		
9		0.8	0.9	800	900		
10		0.9	1.0	900	1000		
11		1.0	1.1	1000	1100		
12		1.1	1.2	1100	1200		
13		1.2	1.3	1200	1300		
14		1.3	1.4	1300	1400		
15		1.4	1.5	1400	1500		
16		1.5	1.6	1500	1600		
17		1.6	1.7	1600	1700		
18		1.7	1.8	1700	1800		
19		1.8	1.9	1800	1900		
20		1.9	2.0	1900	2000		



$$y_1 = 57.627 \times +20.339$$

$$y_2 = 26.657 \times + 185.45$$

$$\text{C.B.R (\%)} = A (D)-B$$

ESTRATOS	Pendiente	AUTORES									C . B . R (%)	
	D	Harrisoh	Australia	Kleyn	Sudáfrica	Tosticarelli	Argentina	Ponce	Chile	Sánchez		Colombia
ML	57.627	3.1		2.4		6.4		2.1		1.9		3.2
SM	26.657	8.5		6.4		14.3		6.4		5.7		8.3
-	-	-		-		-		-		-		-
-	-	-		-		-		-		-		-
-	-	-		-		-		-		-		-

Figura 3.3 Formatos para evaluar el CBR en función del PDC

Fuente: El autor.

3.2.4 CORRELACIÓN ENTRE EL CBR Y MR

De acuerdo a trabajos efectuados sobre la correlación entre el módulo resiliente y el CBR, se encuentran aquellos desarrollados por el Instituto de Aeronáutica de Brasil¹⁴. Se basa en estimar el Mr, como función del CBR para el material de subrasante, a partir del retrocálculo de las deflexiones. Los resultados en una gráfica logarítmica que proporciona resultados obtenidos en investigaciones en el modelo del Laboratorio de Investigación Transporte y Camino (TRRL). Una de las ventajas principales es que los valores son válidos para los CBR que varían entre 4 a 48 y para suelos de subrasante de características tropicales, condiciones similares a un gran sector del territorio nacional.

La primera ecuación que relaciona Mr con el CBR de subrasante se desarrolló hace más de cincuenta años.¹⁵ A partir de ello, se han venido efectuando comparaciones para mejorar la correlación, tanto por resultados de laboratorio como por resultados de campo. A lo largo de veinte años, el doctor Cardoso ha realizado investigaciones sobre la conducta de las expresiones que relaciona el Mr con el CBR, especialmente en resultados obtenidos en el laboratorio, así como de simulaciones por computadora y de estudios de deflexiones.

El Mr, usado por más de tres décadas, se define como la proporción entre el esfuerzo axial desviador dinámico (σ_d) y la deformación axial recuperable (elástica) (ϵ_r).¹⁶

Los trabajos investigados en diferentes instituciones y por diferentes profesionales se orientan a correlacionar el módulo resiliente y el CBR de la subrasante, que sirven de insumo en procedimientos de diseño. Los más usados se presentan en la Tabla 3.2. Cabe anotar que la primera propuesta del modelo Shell es de uso mundial e inclusive lo integra el Instituto del Asfalto (1982) en su metodología de diseño.

¹⁴ Cfr.: Cardoso

¹⁵ Cfr.: Heukelon & Foster 1960, Houkelon & Klomp 1962

¹⁶ Cfr.: Yoder & Witczak 1975

Tabla 3.2 Correlación entre el Mr y el CBR

Modelo	Autor	Datos	Correlación
Shell	Heukelon & Foster 1960, Heukelon & Klomp 1962	Campo	$Mr = 10(\text{CBR})$
U.S. Army Corp de ingenieros (USACE)	Green & May 1975	Campo y laboratorio	$Mr = 38(\text{CBR})^{0.711}$
Consejo Científico de Sudáfrica e Investigación Industrial (CSIR)	Después Witczak 1945		$Mr = 21.1(\text{CBR})^{0.65}$
COPPE/UFRJ Universidad Federal de Río de Janeiro	Medina y Preussler 1982	Laboratorio (CBR entre 2 y 28)	$Mr = 32.75 + 6.73(\text{CBR})$
Laboratorio de Investigación de Camino y Transporte (TRRL)	Lister y Powel 1987	Laboratorio de Investigaciones de Caminos de Norwegian. (Slyngstad & Evensen 1994)	$Mr = 17.6(\text{CBR})^{0.64}$
Fuerza Aérea Brasileña	Cardoso & Witczak 1991, Cardoso et al 1994	Laboratorio, simulaciones de computadora y alguno que otro dato de campo para CBR menos de 15	$Mr = 6.9(\text{CBR})$
Shell (reanalizado)	Hopkins 1994	Campo	$Mr = 17.914(\text{CBR})^{0.874}$
USACE	Barker 1982	Laboratorio	$Mr = 10^{(4.5682 * (1.9661 / 8.55(\text{CBR}))^{(6.5 + \sigma_d)})}$
Universidad de Maryland	Lotfi 1984, Lotfi et al 1988	Laboratorio	$\log Mr = 1.0016 + 0.043(\text{CBR}) - 1.9557(\log \sigma_d / \text{CBR}) - 0.1705 \log \sigma_d$

Fuente: Recopilación.

Las dos últimas correlaciones, que se expresan en unidades (psi), toman en cuenta el Mr en función del esfuerzo desviador (σ_d) basados en los CBR de la subrasante.

Las correlaciones pueden hallarse empleando dos tipos de equipamientos, por un lado Dynatest Falling Weight Deflectometer (FWD), empleando una carga dinámica de 40 kN, y por otro lado la prueba de Viga Benkelman con uso de un camión cargado, con un solo eje trasero de rueda dual de 80 kN (18 000 Libras) de peso y presión de llanta de 0.56 MPa (80 psi).

La deflexión de la Viga Benkelman fue medida usando el método rebound, que básicamente consiste en el movimiento de un vehículo cargado a una velocidad de desplazamiento (Ferne, 1982; Greenstein, 1987; Tosticarelli et al, 1988).

El Instituto de Aeronáutica recomienda la expresión que relaciona el valor de CBR con el Mr. Aunque la solución elástica de multicapas es adoptada por diferentes agencias para analizar estructuras de pavimento, para algunas situaciones en las que se necesita verificar la capacidad de carga de la estructura del pavimento por métodos tradicionales, se recomienda el uso por la Administración de la Aviación Federal (FAA) y la Organización Internacional Civil de Aviación (ICAO) de pavimentos del campo de aviación. Esta es la razón por la que se desarrolló la ecuación CBR como función del Mr¹⁷ dado en MPa.

$$CBR = 0.0624(Mr)^{1.176}$$

La expresión corresponde al análisis de resultados para el cálculo de 2220 deflexiones obtenidas en un Dynatest FWD y con una Viga Benkelman en 22 localidades diferentes de Brasil, cuyo modelo para predecir el Mr es en función del CBR que varía de 4 a 48. En realidad no hay una única constante entre el Mr y el CBR. La expresión comprende un rango de 4.3 a 11.4 MPa para el CBR que varía de 4 a 50.

Heukelon y Klomp han reportado correlaciones entre los valores CBR del cuerpo de ingenieros, usando compactación dinámica y los módulos *in situ* del suelo, como muestra la relación siguiente:

$$Mr \text{ (psi)} = 1500(CBR)$$

La misma expresión es sugerida en el diseño AASHTO, siendo razonable para suelos de gradación fina con un CBR sumergido igual a 10 o menos. En la UNI se desarrolló un trabajo de investigación que proporcionó una expresión entre el CBR y Mr, ejecutado para suelos finos y empleando el triaxial dinámico del laboratorio Geotécnico del CISMID.¹⁸

¹⁷ Cfr.: Cardoso

¹⁸ Cfr.: Gutiérrez- Limaymanta

La Tabla 3.3 presenta la relación entre los suelos clasificados mediante el método SUCS y el valor de CBR asociado a estos.¹⁹

Tabla 3.3 Relaciones aproximadas entre suelos y los valores de CBR

Clasificación SUCS	Rango de CBR	Clasificación AASHTO	Rango de CBR
OH, CH	< 3 a 5	A-7-5, A-7-6	< 2 – 13.5
OL, MH	< 4 a 8	A-6	< 2 – 13.5
CL, ML	5 – 15	A-5	< 2 – 7.8
SC	10 – 20	A-4	3 – 25
SP	10 – 25	A-3	10 – 30
SM	10 – 40	A-2-6, A-2-7	8.5 – 30
SW	20 – 40	A-2-4, A-2-5	25 – > 80
GC	20 – 40	A-1-b	20 – 60
GM	20 – > 80	A-1-a	38 – 80
GP	25 – 60		
GW	60 – > 80		

Fuente: Apéndice DD, AASHTO 2000.

De igual manera, existen correlaciones entre rangos de valores de Mr y los tipo de suelos, propuestas por Shell, para los distintos tipos de suelo según la clasificación SUCS como se observa en la Tabla 3.4 que asocia a los suelos con valores de Mr.

Tabla 3.4 Relaciones aproximadas entre suelos y los valores de Mr

Clasificación SUCS	Rango de Mr (psi)	Clasificación SUCS	Rango de Mr (psi)
OH	1000 – 5000	SM	8000 – 50000
CH	2000 – 7000	SP	10000 – 30000
MH	2000 – 12000	SW	20000 – 60000
OL	2000 – 10000	GC	20000 – 50000
CL	4000 – 15000	GM	20000 – 80000
ML	6000 – 20000	GP	30000 – 80000
SC	8000 - 25000	GW	50000 – 100000

Fuente: Shell.

¹⁹ Cfr.: Apéndice DD, AASHTO 2002

Es importante comentar que en la carretera Iquitos – Nauta, para el diseño, se realizaron ensayos de CBR *in situ*. Para ello, el anillo del molde de CBR se transformó en un elemento cortante tipo “sacabocado” al llevarse al torno para que achaflane el perímetro del anillo. Con el anillo cortante se adaptó al molde para obtener la muestra de la profundidad requerida mediante incrustamiento. De esta manera, el material dentro del molde tendría la densidad y la humedad natural. La prensa de CBR se llevó al campo en donde se penetraron las muestras obtenidas. Sin lugar a duda este valor de CBR es el real para la subrasante evaluada. Así, también este valor será el del diseño.²⁰

3.2.5 VALOR DE DISEÑO

Con los datos de CBR obtenidos por métodos directos en el laboratorio o indirectos con equipo de referencia, se determinará un CBR de diseño para cada sector Si definido. Este valor de diseño se determinará mediante el percentil al 95 %. Podrá emplearse datos de CBR o también de Mr. La Figura 3.4 presenta un ejemplo de la determinación del CBR percentil, en el cual se grafican los valores de CBR con los valores mayores o iguales al valor CBR_p, donde están ordenados de mayor a menor y se han registrado las frecuencias correspondientes. Tanto las frecuencias como los valores mayores o iguales se expresan en porcentajes.

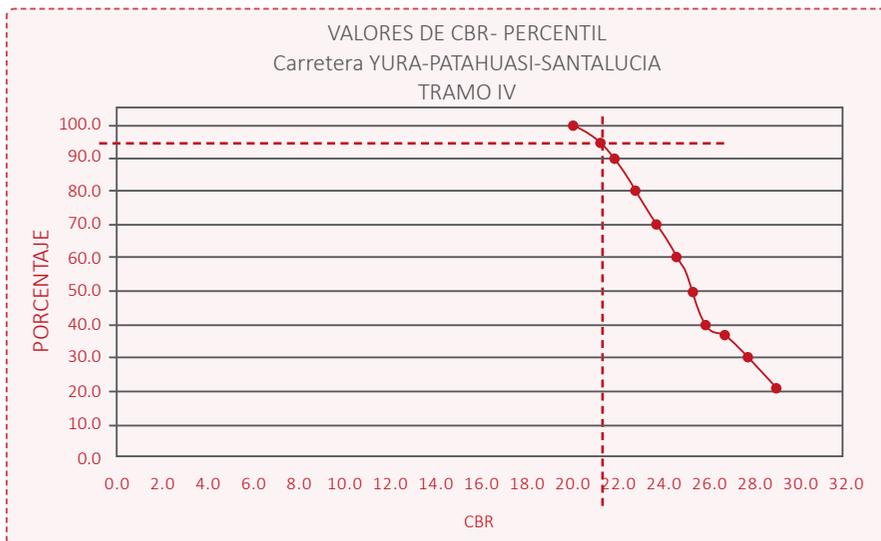


Figura 3.4 Determinación del CBR percentil

Fuente: El autor.

²⁰ Cfr.: Carretera Iquitos – Nauta T-4

La Tabla 3.5 presenta algunas recomendaciones de percentiles a considerar en la etapa de diseño.

Tabla 3.5 Valor de diseño de percentil

Nivel de tráfico (ESAL)	Percentil de diseño (%)
10 ⁴ o menor	60
Entre 10 ⁴ y 10 ⁶	75
10 ⁶ a más	87.5

Fuente: AASHTO.

3.3 VALORES DE INFLUENCIA

3.3.1 NIVEL DE CONFIANZA

Los valores sobre la probabilidad (Z_r) de que el diseño se encuentre dentro de los rangos de seguridad puede establecer el criterio del 95 % y para el cual se tendrá un valor de nivel de confianza igual a -1.645, en caso de que sea 90 % se podrá emplear -1.3.

3.3.2 PROBABILIDAD

El error que puede ocurrir por efecto de contemplar un tráfico (S_o) de baja probabilidad de ocurrencia puede admitir un valor de probabilidad igual a 0.35 o 0.45.

3.3.3 PÉRDIDA DE SERVICIO

Por lo general, los límites de exigencia para el índice de serviciabilidad (PSI) o diferencial entre el inicio y el final exigido puede contemplarse en los términos de referencia emitidos por la entidad licitante.

Esto indica que en el caso del MTC, este recomendará cuál es el valor inicial que deberá tener el PSI cuando la obra se termine (P_o) y luego que brinde el servicio alcance un valor de final (P_t), para lo cual la diferencia participará en la fórmula AASHTO.

Capítulo

4

Diseño de la estructura del pavimento

	K	H
ABET	60	40

Logros:

Determina e interpreta el número estructural (SN) de diseño de la estructura de un pavimento. Transforma el SN a capas componentes de la estructura. Evalúa otras alternativas de estructura.

TEMARIO:

- › *Aplica el método AASHTO de diseño para hallar el SN*
- › *Transforma el SN en capas estructurales como base, subbase y otras*
- › *Determina la alternativa óptima de diseño*

INTRODUCCIÓN

Los trabajos de diseño de pavimentos van más allá de lo establecido por la metodología en el campo profesional. Estos diseños deben estar ajustados a realidades y problemas que solo el profesional puede determinar en las diferentes etapas del desarrollo del estudio. En cada caso, el profesional debe sensibilizarse con lo que encuentra en cada zona evaluada. No todas son iguales y pueden presentar resultados variados.

Se pueden emplear métodos propuestos por la AASHTO o por el Instituto de Asfalto.

El método AASHTO es el más difundido y, a pesar de los avances logrados, se estima que el correspondiente a 1993 mantiene vigencia aún por lo menos hasta que se logre mejores avances con el AASHTO 2000 aún en revisión.

Como alternativa de diseño se cuenta con las recomendaciones del Instituto del Asfalto, el mismo que mejoró sus gráficos para hallar espesores de estructuras, al insertar un parámetro más sobre la temperatura, acortando la diferencia de resultado con el método AASHTO.

La determinación del número estructural, con programas de cómputo, permite una rápida evaluación en el diseño. Lo importante radica en determinar los espesores correctos de las diferentes capas que proporcionan la estructura final y la forma como se relacionará con el terreno de cimentación.

4.1 MÉTODO AASHTO

En lo que respecta al método AASHTO, se toma la información proveniente de la Guide for Design of Pavement Structures, edición 1993, que se basa en el valor de CBR de la subrasante y el número de ejes estándar anticipado, para determinar el número estructural de diseño. Este método proporciona una expresión analítica, que para efectos de cálculos computarizados la solución matemática es sumamente útil. La evolución del método establece las complementaciones siguientes:

- Se introduce el coeficiente de drenaje como parámetro de caracterización de la base granular para fines del número estructural. Indirectamente, se mide la influencia del agua en la capacidad estructural del pavimento.
- Se deja sin efecto el parámetro factor regional.
- Se introduce el concepto de "pérdida de servicio".
- El valor soporte de la subrasante S se reemplaza por el módulo resiliente Mr.
- Se introduce el parámetro de confiabilidad partiendo de la consideración que el comportamiento del tránsito sigue la distribución normal de Gauss.

A pesar de las bondades mencionadas la aplicación de la versión 86, al igual que la del 72, encuentra un vacío en cuanto a la ejecución directa del ensayo que mide el Mr en suelos. Por otro lado, se cuenta con una versión de AASHTO 2000, que se encuentra en revisión.

La fórmula general de la AASHTO – 93, que gobierna el número estructural de diseño, presenta la expresión siguiente:

$$\text{Log}_{10}(W_{18}) = Z_r * S_o + 9.36 * \text{Log}_{10}(\text{SN} + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}_{10} \left[\frac{\Delta \text{PSI}}{4.2 - 1.5} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(\text{SN} + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \text{Log}_{10}(\text{MR}) - 8.07$$

Donde:

W_{18} : Número proyectado de carga equivalente de 18 kip (18 000 lb) de aplicación de carga axial simple.

Z_r : Desviación estándar normal.

S_o : Error estándar combinado del tráfico proyectado y del comportamiento proyectado.

ΔPSI : Diferencia entre índice de serviciabilidad inicial (Po) y el índice de serviciabilidad terminal (Pt).

Mr : Módulo resiliente (psi).

SN : Número estructural indicativo del espesor total del pavimento requerido.

El número estructural, hallado en el diseño, se transforma a espesores de capas componentes de la estructura del pavimento. Cada una de estas capas responde a los requerimientos de calidad que se establece de acuerdo a las especificaciones técnicas. Por lo general, el espesor estará gobernado por la disponibilidad de los materiales en sus fuentes o canteras, o de las conveniencias económicas para la obra.

4.1.1 DESARROLLO DE LA ECUACIÓN AASHTO

Con la finalidad de procesar iterativamente la fórmula indicada, se divide el análisis por componentes. Estas componentes son de fácil proceso y permiten establecer los valores en una hoja de cálculo, como memoria de cálculo – método AASHTO y cuyas partes tienen la forma siguiente:

$$K_1 = \text{Log}_{10}(W_{18}) - Z_r * S_o + 0.20 + 8.07$$

$$K_2 = \text{Log}_{10} \left[\frac{\Delta \text{PSI}}{4.2 - 1.5} \right]$$

$$K_3 = 2.32 * \text{Log}_{10}(\text{MR})$$

Luego de reemplazar y despejar, la ecuación general de AASHTO, se tiene:

$$K_1 - K_3 = 9.36 * \text{Log}_{10}(\text{SN} + 1) + \frac{K_2}{0.40 + \frac{1094}{(\text{SN} + 1)^{5.19}}}$$

Ahora, se considera:

$$J_1 = 9.36 * \text{Log}_{10}(\text{SN} + 1)$$

Además:

$$J_2 = \frac{K_2}{0.40 + \frac{1094}{(\text{SN} + 1)^{5.19}}}$$

Por igualdad se deberá cumplir que:

$$K_1 - K_3 = J_1 + J_2$$

O también:

$$(K_1 - K_3) - (J_1 + J_2) = 0$$

Esta última expresión permite efectuar las iteraciones hasta cumplir la igualdad y por lo tanto encontrar el SN de diseño, como lo muestra la Figura 4.1.

DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES- AASHTO 93 wgl					
INGRESO DE DATOS					
W18	=	3,200,000	10 años		
ZR(%)	=	90			
So	=	0.5			
Po	=	4.0			
Pt	=	2.0			
CBR de diseño	=	15.0			
ESPESOR DE PAVIMENTO					
Subbase					0.0
Base Granular					0.0
Base asfáltica en caliente					0.0
Base asfáltica en frío					0.0
Rodamiento con asfáltico					0.0
Numero estructural existente					0
VIDA ESTIMADA DEL PAVIMENTO ORIGINAL			0 años		
DETERMINACIÓN DE CONSTANTES					
	K1	K2	K3	K1-K3	
	1559764998	-0.130333768	9.69639931	5.9012507	
ITERACIÓN	SN	J1	J2	J1-J2	CONTROL
1	3.420	6.0412	-0.1466	5.8945	0.0067
2	3.421	6.0421	-0.1467	5.8954	0.0059
3	3.422	6.0430	-0.1468	5.8962	0.0051
4	3.423	6.0439	-0.1469	5.8970	0.0042
5	3.424	6.0448	-0.1470	5.8978	0.0034
6	3.425	6.0457	-0.1471	5.8987	0.0026
7	3.426	6.0467	-0.1472	5.8995	0.0018
8	3.427	6.0476	-0.1473	5.9003	0.0009
9	3.428	6.0485	-0.1474	5.9011	0.0001
10	3.429	6.0494	-0.1475	5.9020	0.0007
NÚMEROS ESTRUCTURALES:					
DE DISEÑO:		SNdis =	3.428		
REQUERIDO:		SNreq =	3.428		
ALTERNATIVA DE DISEÑO					
CARPETA ASFÁLTICA			75 cm		
BASE GRANULAR			192 cm, para un CBRc de 80%		
SUBBASE			0.0 cm, para un CBR de 40%		
SUBBASE RECUPERADA			25.0 cm, para un CBR de 25"		
Espesor Total			51.7 cm		

Figura 4.1 Evaluación de la fórmula AASHTO

Fuente: El autor.

La Figura 4.2 presenta la aplicación de la fórmula AASHTO para diferentes condiciones de tráfico como de capacidad de soporte CBR. Si se establece un espesor de carpeta asfáltica, entonces se podrá determinar el espesor de base granular para cualquier valor de CBR encontrado en un sector. Cabe anotar que la tendencia en la gráfica refleja que las diferencias que existe entre dos CBR mayores a 40 refleja aproximadamente 2.5 cm de espesor de base, lo que indica que la atención debe estar orientada a los suelos que tienen menores capacidades de soporte, como los suelos finos.

Luego, los espesores de las estructuras son más sensibles cuando los valores de CBR son más bajos. Es decir, en condiciones de suelos o diseños de carreteras en la zona de selva alta y baja, se tendrá este tipo de variación en la estructura, por lo cual se debe poner especial atención en la elección de los valores de diseño.

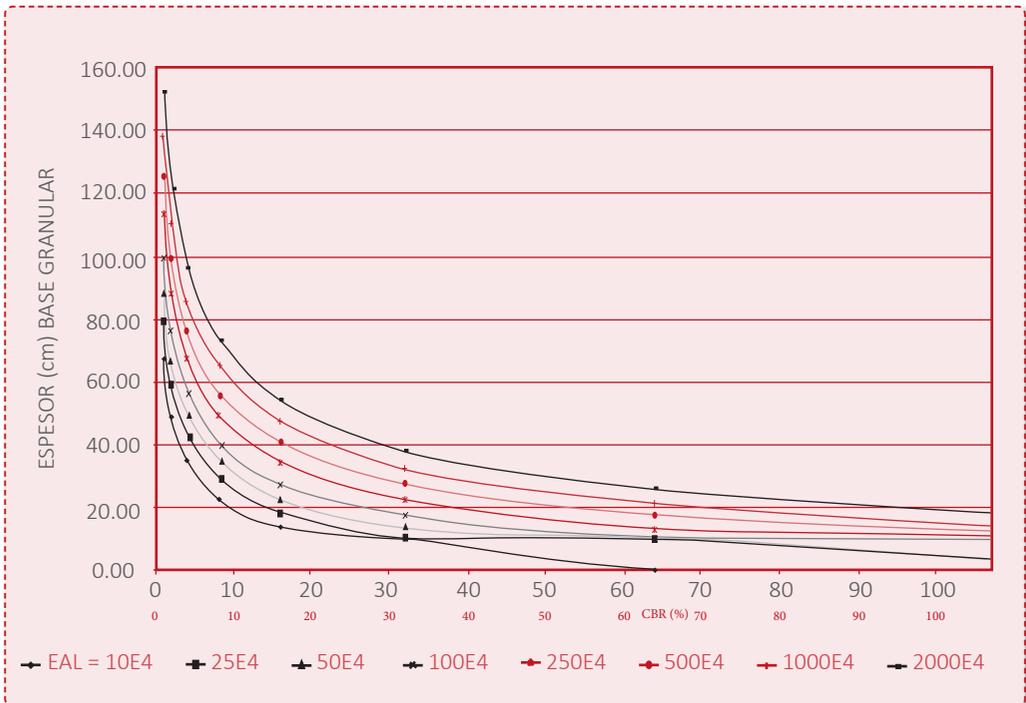


Figura 4.2 Curvas de espesor de base granular para distintos tráficos

Fuente: El autor.

La determinación del número estructural (SN) también puede hallarse a partir del nomograma de la fórmula propuesta por AASHTO, la cual se muestra en la Figura 4.3, donde se ingresa con los valores de confiabilidad y desviación estándar y se proyecta una recta hasta la primera línea de apoyo. Desde este último punto se proyecta empleando el valor del tráfico hasta la segunda línea de apoyo y finalmente, empleando el módulo Mr y la pérdida de serviciabilidad, se halla el número estructural SN.

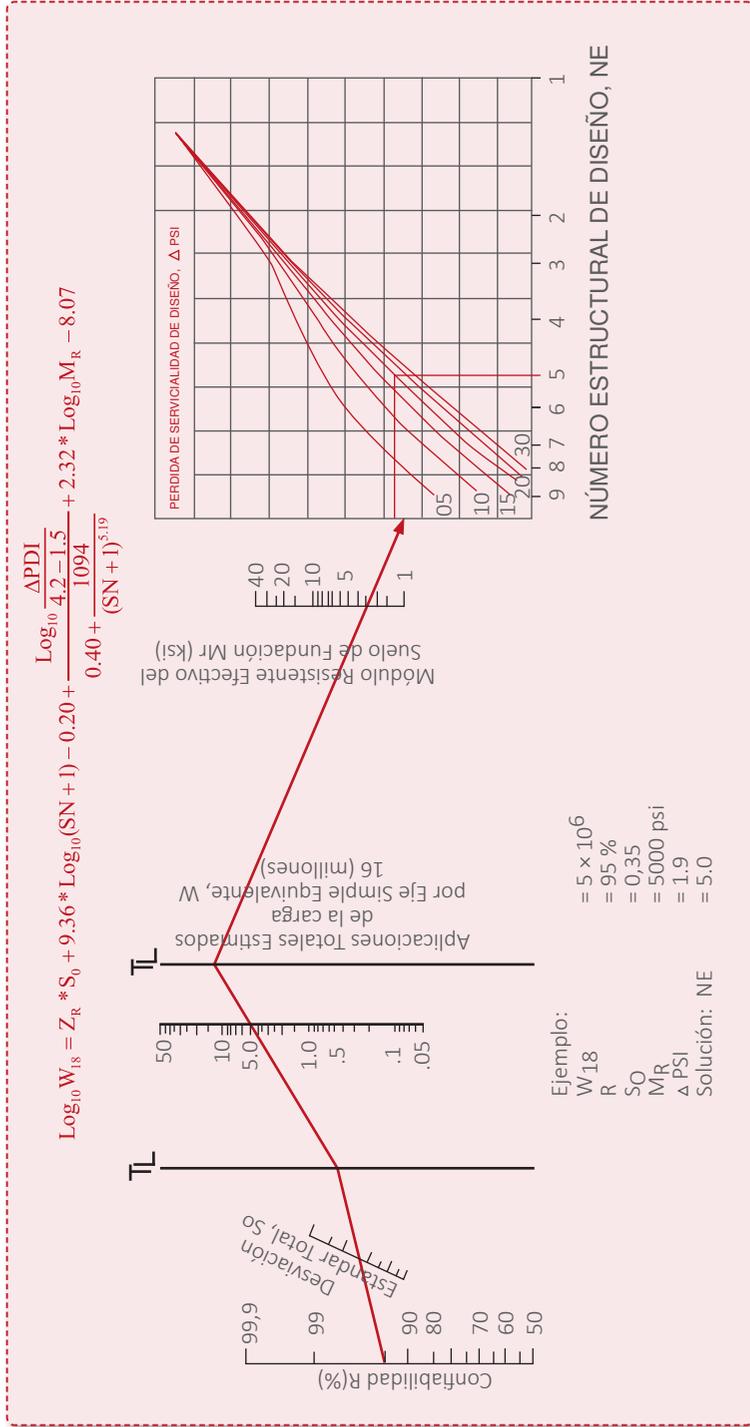


Figura 4.3 Solución del nomograma de la expresión AASHTO

4.2 TRANSFORMACIÓN A CAPAS DE PAVIMENTO

Los espesores finales del refuerzo o estructura recomendada (carpeta, base, subbase) se determinan empleando la expresión propuesta por la AASHTO, la cual comprende los coeficientes de transformación para cada tipo de capa. Para la transformación del número estructural en capas granulares y carpeta de rodadura, se emplea la expresión siguiente:

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3$$

Donde:

a_i = Coeficiente de la capa “i”.

D_i = Espesor de la capa “i”.

m_i = Coeficiente de drenaje de la capa “i”.

La Tabla 4.1 presenta los coeficientes de equivalencias de espesor. De acuerdo a los materiales empleados para elaborar la estructura, se podrá determinar los coeficientes de espesor en función a sus CBR. Los coeficientes se presentan para la superficie de rodadura, las bases granulares y subbases.

La combinación de los materiales y sus coeficientes de equivalencia justificarán el número estructural hallado en el diseño.

Tabla 4.1 Coeficientes de equivalencia de espesor

Componente del pavimento	Observación	Coefficiente ai
Capa superior		
• Carpeta concreto asfáltico tipo superior		0.17/cm
• Mezcla asfáltica en frío, en camino	(baja estabilidad)	0.08/cm
• Tratamiento superficial bituminoso tipo doble/triple		0.25 – 0.40 *
• Sello asfáltico (con agregados)		0.08 *
Bases		
• Bases tipo concreto asfáltico		0.17/cm
• Bases granulares		
- Grava arenosa	CBR = 40 %	0.04/cm
- Grava arenosa	CBR = 60 %	0.05/cm
- Grava arenosa	CBR = 80 %	0.06/cm

Agregado pétreo triturado	CBR > = 100 %	0.07/cm
Base granular tratada con asfalto		0.135/cm
Base granular tratada con cemento		0.12/cm
Base granular con cal		0.06 – 0.12/cm
Subbases		
• Arena, arcilla arenosa	CBR = 10 %	0.03/cm
	CBR = 25 %	0.04/cm
• Grava arenosa	CBR = 40 %	0.045/cm
	CBR = 60 %	0.05/cm

(*) Globales, no se considera el espesor.
Fuente: CONREVIAl.



Capítulo

5

Consideraciones para la rehabilitación de pavimentos

ABET	K	H
	80	20

Logros:

Comprende diferencias del número estructural, según ubicación de los pavimentos, así como de las capas que lo conforman. Determina la degradación de la estructura. Halla la estructura requerida para un mayor tiempo de vida útil.

TEMARIO:

- › *Análisis de rehabilitación de pavimentos*
- › *Modelación geotécnica*
- › *Factores de influencia - altitud*

INTRODUCCIÓN

El esquema de estudio de pavimentos asfálticos presenta tres líneas bases, que se requieren para afrontar los problemas en la red vial nacional: construcción, rehabilitación y mantenimiento.

La construcción de una nueva estructura demanda trabajos relacionados a la exploración de campo y ensayos de laboratorio. Luego, mediante la integración de la información recopilada, se realiza el análisis y el diseño correspondiente del pavimento.

La línea base correspondiente a la rehabilitación demanda trabajos como evaluación de la estructura existente que permite establecer el estado situacional del pavimento, ya sea del punto de vista superficial como estructural. Esta evaluación se realiza mediante los métodos que actualmente son recomendados por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Con la información recopilada y procesada se realiza el análisis para obtener los parámetros o insumos de diseño con el fin de aumentar el tiempo de vida útil.

Cuando los trabajos proyectados, en la etapa de rehabilitación, son ejecutados, se presenta una nueva línea base orientada a establecer actividades estratégicas de mantenimiento, basadas en la proyección de formaciones de fallas, que permita una servicibialidad sostenible.

La red de aprendizaje presenta las líneas bases mencionadas en las que se desprenden métodos aplicados y que se indican mediante siglas que corresponden a las metodologías que actualmente sugiere el MTC y otras propuestas para sus convocatorias.

Los trabajos en las etapas de construcción o mantenimiento se interpretan con menor complejidad que los casos o situaciones para realizar proyectos de rehabilitación, ya que este último no define una única solución. Los trabajos con fines de rehabilitación emplea una metodología tradicional casi en un 80 % del desarrollo total del proyecto. El 20 % restante es aportado por la experiencia del proyectista de una manera sui generis.

Para establecer el marco teórico, se tendrá en cuenta aquellos métodos o metodologías definidas y aplicadas tradicionalmente en los trabajos de la red vial.

5.1 ANÁLISIS DE REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS

El medio profesional cuenta con programas de cómputo, que realizan análisis de rehabilitación de pavimentos. Estos integran los resultados tanto de evaluación superficial, como de evaluación estructural calculados mediante ensayos destructivos. Los software integran información de fallas de la superficie del pavimento y espesores de las capas que conforman la estructura determinados mediante la ejecución de “calicatas” o excavaciones a “cielo abierto”. Los procesos incluyen factores de deducción por cada falla que presenta el pavimento y que degrada la estructura. Se considera el tráfico y su crecimiento gradual de ejes equivalentes asociando un PCI y una correspondiente alternativa de solución. Como resultado final del análisis de los insumos, el proceso simula la degradación de la estructura a lo largo de los años y genera alternativas de solución, calculando la vida remanente añadida por las actividades de mantenimiento ejecutadas. Se elige en condiciones esperadas como:

- Número de años exigidos en la rehabilitación
- PCI requerido
- Costo de las obras de mantenimiento o rehabilitación

El método SARP²¹ requiere de varios insumos, pero principalmente del PCI y se orienta a evaluar los trabajos a nivel de proyecto, que luego se podrá integrar a un programa de gerencia de inversión en pavimentos, que evalúa a nivel de red vial.

Para los casos de evaluar el SARP, se requerirá de una planilla de recolección de datos, como se muestra en la Figura 5.1, donde se aprecia que los datos corresponden a la evaluación superficial y estructural.

Se presenta las salidas del programa SARP que permite obtener la vida añadida al pavimento mediante alguna alternativa de mantenimiento.

²¹ Jugo Burguera. Sistema de análisis de rehabilitación de perímetros

+++++
 PLANILLA DE RECOLECCIÓN DE DATOS <SARP>
 +++++

TRAMO: Km. 1120 - Km. 1140
 CÓDIGO GIP DEL TRAMO: M - ST - 8 FECHA: JUN-06
 OPERADOR: W. GUTIERREZ L
 FECHA DE EVALUACIÓN Y/O COMENTARIOS: ABRIL-06
Trabajos realizados para preparar el presupuesto 2007
 ALTURA MEDIA (m) SOBRE NIV. MAR: 1100
 NIVEL DE CONFIANZA (50, 70 o 90 %) 50 PCI 64
 PDT ACTUAL (vpd- 2 dir) : 752 AÑOS DE SERVICIO: 22
 ES SEGURA LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO POR FRICCIÓN (s/n): 5

PCI- FALLAS- VALOR DE DEDUCCIÓN (VD)

Nº FALLAS EN EL PAV. n = 8

	V.D.		
1 Grieta piel / cocodrilo	89	CBR DE DISEÑO:	45
2 Exudación de asfalto	11		
3 Grietas de contracción	64	ESPESOR	
4 Elevac / hundimientos		PAVIMENTO	cm.
5 Corrugaciones		Subbase	
6 Depresiones		Base granular	35
7 Grietas de borde	16	Base asf. en cal.	
8 Grieta reflex. junta		Base asf. en frío	
10 Grietas long / transv.	68	Rodamiento con asf.	5
11 Baches / zanjas rep.	14		
12 Agregado pulido	18	Vida estimada del	
13 Huecos		pav. Orig. (años)	20
15 Ahuellamiento			
16 Deform. por empuje		% Camiones	50.2
17 Grietas deslizam.		Factor camión	8.7
18 Hinchamiento		% Crecimiento Traf.	3.0
19 Disgreg / desinteg.	18	Número de canales	2
		Ancho de canal	3.6

SISTEMA DE ANÁLISIS DE REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS

**** S A R P – G.I.P - Versión 1.0 ****

TRAMO: Km 1108- km 1117
TRAMO CÓDIGO: M-ST-6

FECHA: 9-92
OPERADOR: W. GUTIERREZ L.

**** DATOS DEL TRAMO ****

FECHA RECOLECCIÓN DE DATOS Y/O COMENTARIOS: 8-92

ALT. SNM (mts.) = 1100

AÑOS EN SERVICIO = 22

PDT (vpd) = 752

PCI = 52

VIDA EST. PAV. ORIGINAL = 20

% CAMIONES =

50.20001

COND. SUPERF.: Segura

FACTOR CAM. = 8.7

CANALES = 2 / 3.6 M.

NIVEL DE CONFIANZA (%) = 50 %

CRECIMIENTO = 3

<PCI>

Pt . FALLA

VALOR DE DEDUCCIÓN

1 Grieta piel / cocodrilo

90

3 Grietas contracción

74

10 Grietas long. / transv.

12

11 Baches / zanjas rep.

74

19 Disreg. / desinteg.

7

<ESTRUCTURA PAVIMENTO>

<Cm.>

CBR de diseño

= 35

Superficie concreto asfáltico

5.5

Base granular

30.0

***** ANÁLISIS DE RESULTADOS *****

N° ALTERNATIVA DE M&R	VIDA EST. (años)		COSTO / Km	PCI (d)
	TOTAL	VRE (+)		
- -> VIDA REMANENTE ESTIMADA	2.2			
1 Bacheo de áreas críticas	3.5	1.3	72	74
2 Bacheo extenso	4.4.	2.2	115	81
3 Sello con agregado	4.4.	2.2	57	81
4 Lechada asfáltica	4.4.	2.2	86	81
5 Bacheo de áreas críticas (+) Sello con agregado	6.8	4.5	130	99
6 Bacheo de áreas críticas (+) Capa refuerzo CA e= 7cm.	30.0 Pt	27.8	465	99
7 Rec. Sup. + adit. / asf./ agreg	6.2	4.0	144	99
8 Rec. Sup. + 3 cm. mezcla asf.	20	15.0*	270	99
9 No hacer nada	2.2	0.0	0	52

<COMENTARIOS>

Área estimada de bacheo % = 30.0

Posible causa de falla : COMBINADA, NO SE DETECTA CAUSA PREDOMINANTE

* Máxima vida remanente agregada por esta alternativa

Pt Debido a que el daño ambiental y otros factores no son considerados 30 años es la max. vida asumida para el pavimento rehabilitado.

Figura 5.1 Recolección y procesamiento de datos – programa SARP

A nivel mundial, se maneja el tema de Sistema de Gestión de Carreteras (SGC), que evalúa la infraestructura con la finalidad de establecer actividades de mantenimiento optimizando la inversión.

La gestión de carreteras, así como la administración, tiene mucho que ver con las inversiones en pavimentos según las actividades establecidas para una rehabilitación. Se define como "*gestión en la geotecnia establecidas*" (G^2V) para establecer una muy cercana coincidencia con un sistema de gestión que permita elegir la mejor alternativa como solución contrastada con la economía de la obra. Para ello, se cuenta con la adecuación del programa referido al Sistema de Análisis de Rehabilitación de Pavimentos (SARP), desarrollado por el doctor Jugo Burguera, como parte de una Gerencia de Inversión de Pavimentos (GIP) para obtener su grado de doctor, entre otros.

Es conveniente aclarar que SARP emplea insumos provenientes del modelo también propuesto y llamado GEO-PAV, descrito en el presente, donde emplea factores directos y de influencia, como insumos al programa. Se llaman factores directos a aquellos que desde un inicio se han empleado en la determinación de los números estructurales de diseño, desde el AASHTO 72; y se llaman factores de influencia a aquellos nuevos valores que permiten reajustar a la realidad de la zona en que se realizará la obra, permitiendo la adaptación del método para la obtención de resultados coherentes.

El programa SARP integra las informaciones provenientes de la evaluación superficial efectuada al pavimento con su correspondiente evaluación estructural, haciéndolo más completo que otros programas empleados en el medio.

La propuesta de realizar un programa de G^2V se basa en procesar la información indicada y hallar alternativas de solución asociadas al valor de PCI correspondiente, de tal manera que, basado en la inversión que se deba hacer para la propuesta, permita la toma de decisiones a nivel proyecto, que luego podrá ser llevado a nivel de red.

5.2 MODELACIÓN GEOTÉCNICA

Se realiza un trabajo ordenado y sistemático para obtener los diferentes parámetros necesarios en el diseño de pavimentos flexibles. Deben estar acordes a las demandas ingenieriles de cada región del país y estar referidos a un sectorizado coherente de alguna vía en estudio.

El proceso involucra los parámetros tradicionales requeridos en los diseños, que en la mayoría de los casos se emplean de manera indiscriminada sin previa evaluación ingenieril.

Tal como se indicó al principio de este trabajo, GEO-PAV es una propuesta ordenada y racional de recolectar datos, que permita su procesamiento con fines de sectorización y que posteriormente delimite diseños para cada uno de los sectores encontrados, con resultados finales evaluados mediante una gerencia de inversión de pavimentos.

El proceso considera el modelo de degradación de la estructura, que el usuario puede procesar mediante el uso de programas de cómputo. La Tabla 5.1 presenta el esquema que integra la mayoría de las variables que deben ser empleadas en los diseños de pavimentos en las distintas regiones del territorio nacional.

Tabla 5.1 Parámetros de diseño estructura GEO-PAV

Sistema de Análisis de Rehabilitación de Pavimentos (SARP)	Factores directos de diseño AASHTO	Tráfico (N)	Composición (tipo de vehículos)
			Volumen (IMD)
			Factor destructivo (Fd)
			Tasa de crecimiento (r)
			Proyección
		Zr	Probabilidad de diseño
		So	Afectación del tráfico
		PSI	Valor de rugosidad (BI)
			IRI
			PSI
		Mr	CBR (laboratorio, campo, correlaciones, percentil)
MT vs CBR			

<p>Sistema de Análisis de Rehabilitación de Pavimentos (SARP)</p>	<p>Factores de influencia (indirectos y complementarios)</p>	<p>Geografía</p>	Altitud
			Sección topográfica
			Gradiente de temperatura
			Precipitación anual y factor ambiental
		<p>Índice PCI</p>	Tipos de fallas
			Valor de deducción
			Condición de pavimento
		<p>Número estructural existente SNe</p>	Calicatas
			Espesores
			Factores transformación
		<p>Seguridad al deslizamiento</p>	<p>Fricción neumático-superficie</p>

Fuente: El autor.

Tal como muestra la estructura GEO-PAV, entre los factores directos y de uso tradicional se presentan el tráfico, los valores estadísticos Z_r y S_o , el valor de PSI tanto al inicio como al final esperado y el valor de CBR. Además, integra información y factores de influencia, que caracterizan a la región del estudio, particularizando el diseño de la estructura del pavimento.

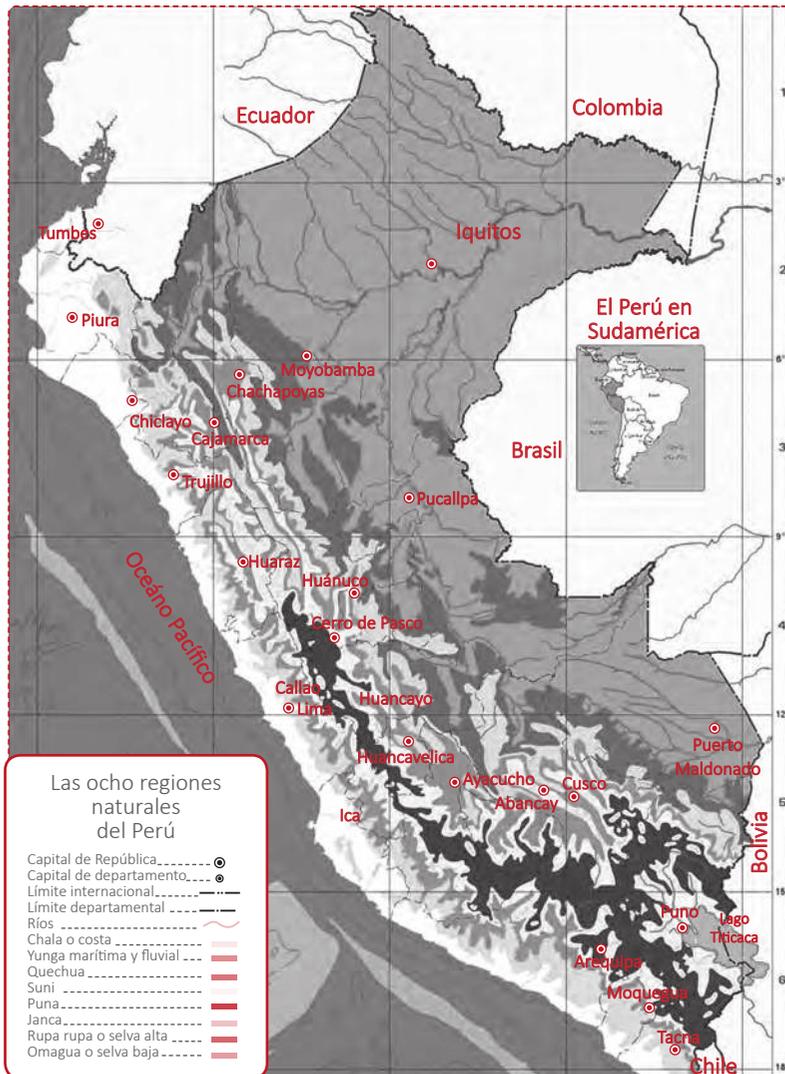
5.3 FACTORES DE INFLUENCIA

Los factores de influencia son aquellos parámetros indirectos que no han participado tradicionalmente en los diseños de pavimentos, pero que hoy son complementos que permiten diseños coherentes basados en la realidad del territorio nacional. Se cuenta con la altitud, el PCI, el SN existente y la adherencia o fricción entre el neumático y la superficie asfáltica, información que debe ser tomada como punto de partida para la evaluación.

El doctor Javier Pulgar Vidal, investigador de la geografía humana del Perú, en su libro *Geografía del Perú*, trata sobre las ocho regiones naturales evaluadas de una manera transversal al territorio nacional y estableciendo diferencias ecológicas en cada una de ellas. Si bien no es motivo principal del trabajo, el profundizar en el tema de las regiones se considera importante los aportes del doctor Pulgar para establecer las diferencias sustanciales en las carreteras de penetración, que atraviesan diferentes regiones del país, información que debe ser tomada como punto de partida para la evaluación.

5.3.1 ALTITUD

El mapa mostrado en la Figura 5.2 de las ocho regiones naturales detalla en colores las diferentes regiones donde también se aprecian en corte. Se tiene las regiones costa o chala, yunga, quechua, suni o jalca, puna, janca o Cordillera, rurarupa o selva alta y omagua o selva baja. Los detalles de altitudes se muestran en la Tabla 5.2, en donde se aprecia la variedad que presenta las regiones del país. Además, se ha integrado información referente a la temperatura máxima y mínima, como también de las precipitaciones máximas alcanzadas. Cabe anotar que la tabla no registra las lluvias extraordinarias correspondientes al fenómeno de El Niño.



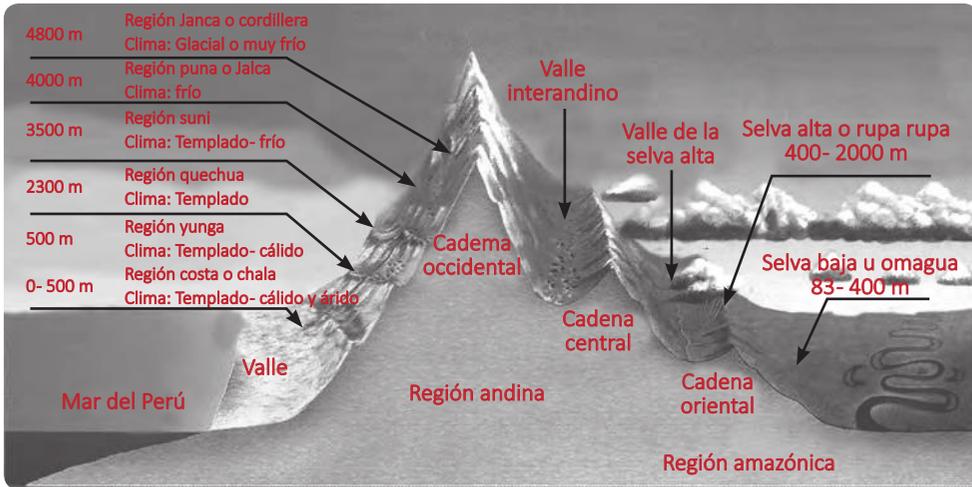


Figura 5.2 Mapa de las ocho regiones naturales (Pulgar Vidal)

Tabla 5.2 Características de las regiones naturales

N°	Región	Altitud (m s. n. m.)	Precipitación máx anual (mm)	Temperatura (°C)	Sección típica de la vía		
1	Costa o chala	0 -500	500	19.2 – 22.5	✓		
2	Yunga	500 – 2300	Aguaceros	20.0 – 27.0	✓	✓	
3	Quechua	2300 – 3500	En verano	-4.0 – 29.0		✓	
4	Suni o jalca	3500 – 4000	800	-16.0 – 20.0		✓	✓
5	Puna	4000 – 4800	1000	-25.0 – 22.0		✓	✓
6	Janca o cordillera	4800 – 6768	S/. estación	-8.25 – 8.25	✓		✓
7	Rupa rupa o selva alta	400 – 1000	3000	8.0 – 33.0		✓	
8	Omagua o selva baja	80 - 400	2858	17.8 – 36.9	✓		

Fuente: Adaptación sobre la base de Pulgar Vidal.

Las carreteras de penetración son las que presentan mayor dispersión en los parámetros de diseño debido al desarrollo transversal del país y su heterogeneidad. La Figura 5.3 presenta el mapa político del Perú y se asocia a algunos ejes transversales que permite evaluar las diferentes altitudes y regiones que atraviesan las carreteras.

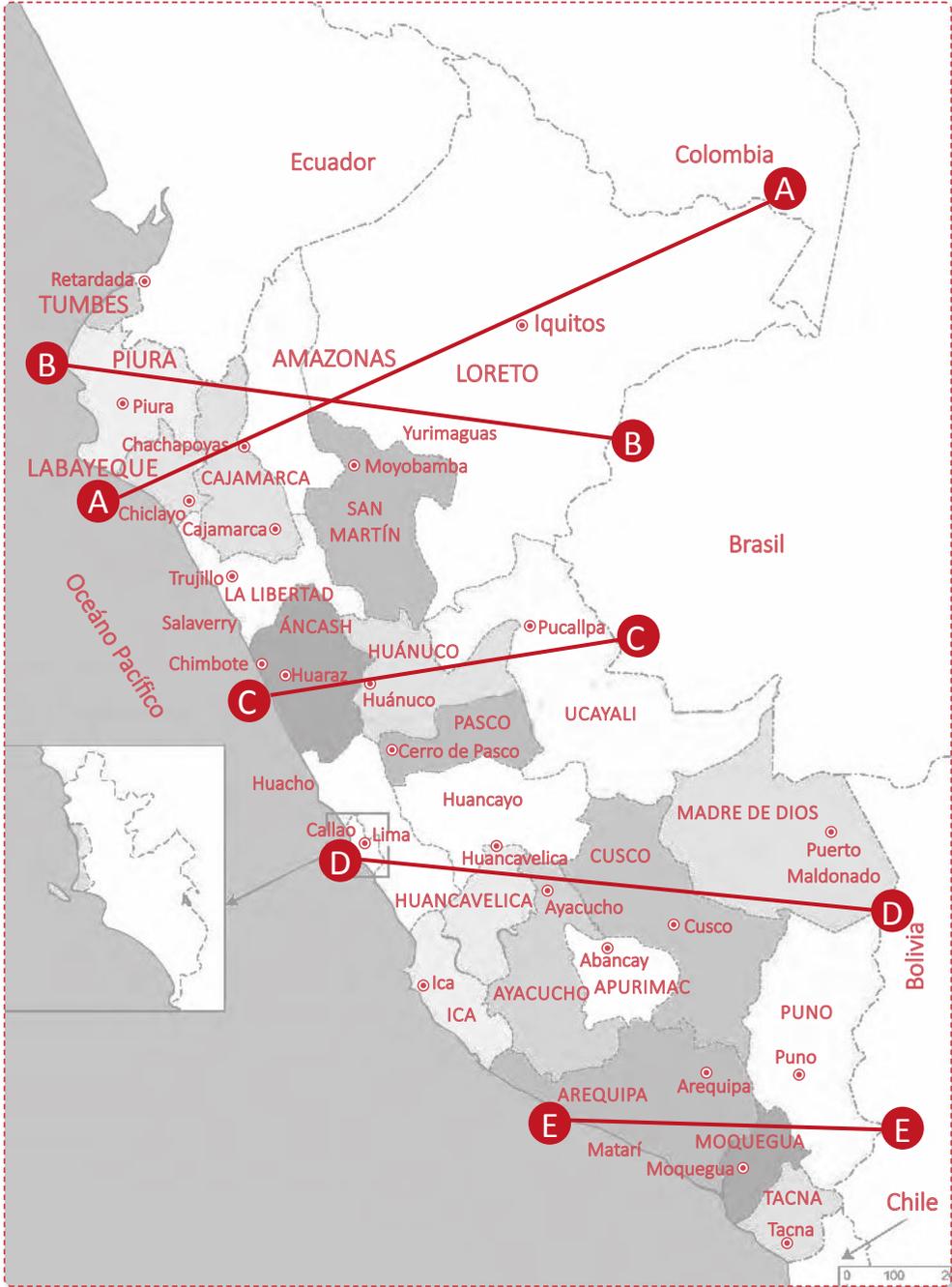
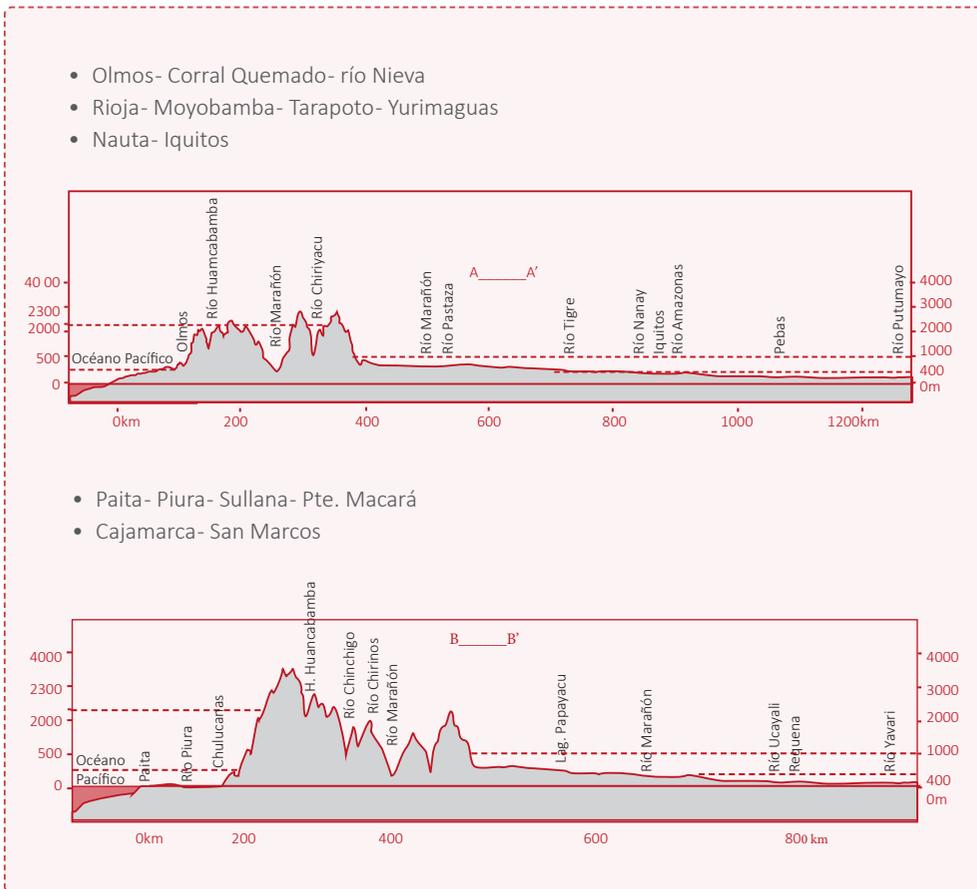
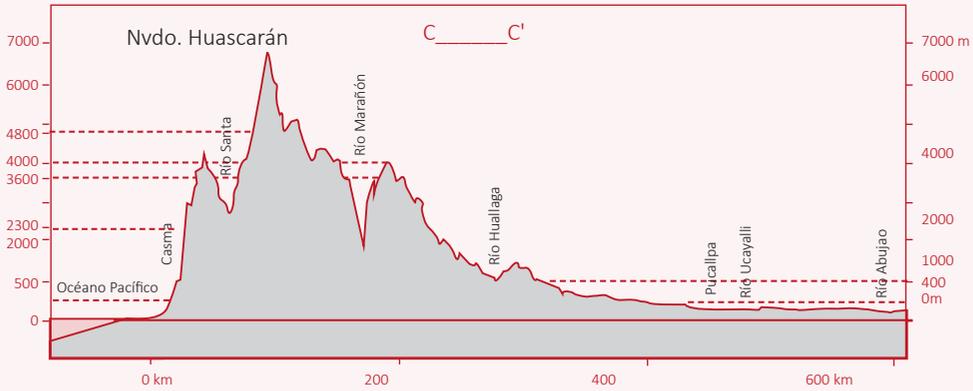


Figura 5.3 Ejes transversales de diferentes altitudes y regiones

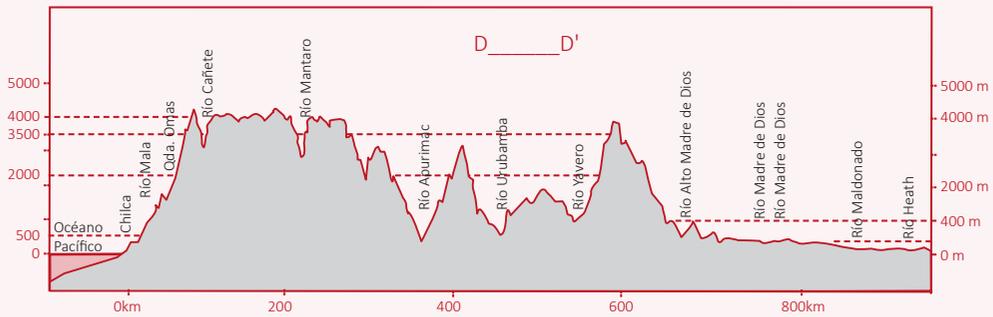
Cada uno de los ejes trazados se aproxima a los desarrollos de las carreteras principales del país, los mismos que se presentan en la Figura 5.4. Se presenta el eje AA, en donde por el norte se orienta la carretera Olmos – Corral Quemado – río Nieva – Rioja – Moyabamba – Tarapoto – Yurimaguas y la carretera Nauta – Iquitos. El eje BB coincide con las carreteras Paita - Piura – Sullana – Puente Macará y la carretera Cajamarca – San Marcos. El eje CC integra a las carreteras Pativilca – Huaraz – Catac – Tunel Cahuish – Chavín - Huari - San Marcos y la carretera que une Tingo María – Aguaytía – Pucallpa. El eje DD integra la orientación de las carreteras Pisco – Ayacucho – San Francisco y la carretera Cusco – Urcos – Quince Mil. Finalmente, el eje EE integra la orientación de las carreteras Yura – Patahuasi – Santa Lucía y la carretera Santa Rosa - Pucará – Juliaca – Puno – Desaguadero.



- Pativilca- Huaraz; Catac- Túnel Cauhuish- Chavín
- Huari- San Marcos; Tingo María- Aguaytía- Pucallpa



- Pisco- Ayacucho- San Francisco
- Cusco- Urcos- Quince Mil



- Yura- Patahuasi- Santa Lucía
- Santa Rosa- Pucará
- Juliaca- Puno- Desaguadero

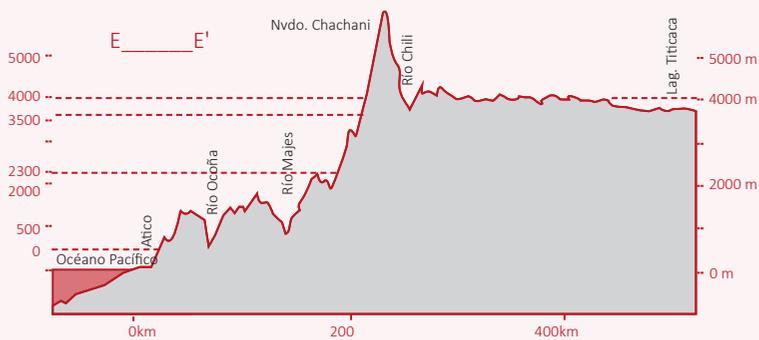


Figura 5.4 Ejes principales y elevaciones de las carreteras de penetración

Fuente: El autor.

De las secciones observadas se aprecia la gran heterogeneidad de altitudes, temperaturas y precipitaciones a las que están afectas las carreteras en el país y lo cual sustenta que los métodos o las metodologías de diseño propuestas en la actualidad no logran discriminar todas estas características indicadas. Por lo tanto, se requiere de trabajos de investigación para determinar diseños propios y coherentes que solo los peruanos pueden aportar para tales fines. No se cuenta con un manual propio para estos trabajos, en los cuales se generen recomendaciones de diseño para cada una de las regiones establecidas y comentadas anteriormente.

5.3.2 NÚMERO ESTRUCTURAL EXISTENTE (SNe)

Para determinar los trabajos de rehabilitación y el espesor de refuerzo a colocar, se deberá determinar el aporte estructural del pavimento existente. No tendrá un aporte como una estructura nueva, pero definitivamente las capas conformantes y la superficie de rodadura aportan estructuralmente y, por lo tanto, el refuerzo solo será el faltante para soportar las cargas de diseño.

Para evaluar la estructura existente, se deberá ejecutar calicatas o excavaciones que permitan apreciar los espesores en servicio. Registrando, además, las calidades de los materiales conformantes, así como sus densidades se podrá hallar el aporte del número estructural del pavimento existente (SNe). La superficie de rodadura constituida por la carpeta asfáltica sí presenta deterioro por los años de servicio. Para ello, se deberá registrar el espesor de la capa asfáltica que por su coeficiente de transformación, y por otro coeficiente de degradación, presentado en la Tabla 5.3, proporciona el aporte estructural de esta capa.

Tabla 5.3 Coeficientes de reducción por deterioro de carpeta asfáltica

Tipo de fisura	Deformación (mm)	Coefficiente
4	10	0.8
6	20	0.6
8	30	0.4
10	30	0.3

Fuente: Fisuración tipo o deformaciones, catálogo CONREVAL.

Las deformaciones se miden con una regla de 1.20 m, colocándose transversalmente al problema y se les atribuye a una baja estabilidad propia de la mezcla.

5.3.3 FRICCIÓN NEUMÁTICO-SUPERFICIE

La fricción entre el neumático y la superficie asfáltica está asociada a indicar si la superficie del pavimento es segura o antiresbalante, desde el punto de vista de fricción. Es muy poco lo desarrollado sobre esta materia. Se han determinado trabajos para evaluar la textura de la superficie asfáltica, empleando el equipo del péndulo, así como el método del círculo de arena, los cuales determinan a nivel micro y macro respectivamente.

5.4 SECTORIZACIÓN

La integración final aporta una alternativa más para lograr el sectorizado de la vía según la variable trabajada. La Figura 5.5, a manera de ilustración, presenta las variables empleadas en la evaluación del pavimento. Se observa que se ha colocado información sobre fallas encontradas y relevadas por el método del PCI. Se aprecia también el ahuellamiento registrado con una regla de aluminio colocada transversalmente y midiendo la deformada. Cuando estos valores son iguales o mayores a 12 mm, se requerirá de un recapeo. Se integra información proveniente de la evaluación deflecométrica, en donde se aprecia también valores producto de la evaluación estadística. Se han colocado los registros de excavación proveniente de las calicatas ejecutadas en diferentes progresivas. La transitabilidad es un valor cualitativo que proporciona el ingeniero evaluador y que lo registra a lo largo de los trabajos de campo, en que evalúa el confort al paso del vehículo. En la parte final se integra información del índice de la condición del pavimento y la condición misma.

Cada variable aporta un sectorizado particular. Al inicio conviene realizarse de manera individual y luego integrarlos para definir el sectorizado final. El sectorizado corresponde a una etapa en la que el profesional especialista aporta su experiencia para definir cuáles serán los sectores a tratar en el diseño a manera separada. Cada sector tendrá un diseño independiente y la integración de todas las variables hará una propuesta sólida y coherente.

Capítulo

6

Evaluación superficial

ABET

K

H

70

30

RANGO DEL PCI	COLOR	TIPO DE MANTENIMIENTO
86-100 EXCELENTE		MANTENIMIENTO RUTINARIO Y PREVENTIVO
71-85 MUY BUENO		(Sello de fisuras, parches, lechadas asfálticas)
56-70 BUENO		MANTENIMIENTO CORRECTIVO
41-55 REGULAR		(Recapado)
26-40 POBRE		REHABILITACIÓN MAYOR (Reemplazo de carpeta asfáltica)
11-25 MUY POBRE		RECONSTRUCCIÓN (Reemplazo de base granular y carpeta asfáltica)
0-10 FALLADO		

Logros:

Aplica métodos de evaluación del estado superficial de los pavimentos. Define fallas identificando la magnitud y la densidad dentro del sector evaluado. Determina la condición del pavimento para el cual concluye con el valor del PCI.

TEMARIO:

- › Métodos de evaluación del estado superficial del pavimento
- › Catálogo de fallas de pavimento
- › Método del Índice de la Condición del Pavimento (PCI)

INTRODUCCIÓN

La evaluación superficial responde lo solicitado en los términos de referencia del MTC. Debido a los trabajos e inversiones efectuados en los años 80, se recomienda emplear los métodos desarrollados por CONREVIAL. Los métodos responden a objetivos cualitativos y no así a los cuantitativos. Los problemas se presentan en la limitación de metrados que permiten el análisis de precios unitarios y la determinación del presupuesto de obra. Las limitaciones se han apreciado durante los últimos años de rehabilitación de carreteras en el país.

Existen varios métodos para efectuar relevamientos de fallas y todos por contrastación con catálogos propuestos por diferentes instituciones internacionales. Cabe mencionar que no se ha desarrollado una metodología de evaluación nacional. Sin embargo, desde los años 90, se aplicó métodos de acuerdo a las recomendaciones planteadas por la USACE, en la cual se puede efectuar evaluaciones con resultados tanto cualitativos como cuantitativos.

El método de CONREVIAL define el tipo de falla y la severidad del área evaluada que coincide con la evaluación estructural. El método propuesto por la USACE determina el Índice de la Condición del Pavimento (PCI), el tipo de falla, su magnitud, su severidad y la densidad con respecto al área evaluada.

Los trabajos de evaluación superficial deben brindar información potencial como el estado situacional de la vía, posibles causas de los problemas suscitados y posible solución, como se explica más adelante.

Los diseños de la estructura de un pavimento dependen de diferentes factores que sirven de insumos para determinar el número estructural. Uno de estos parámetros corresponde al tiempo de diseño deseado para el servicio del pavimento. Los objetivos se alcanzan, siempre y cuando exista un plan de mantenimiento en el cual se basa la evaluación superficial.

6.1 METODOLOGÍA CONREVIAL

El Consorcio de Rehabilitación Vial (CONREVIAL) presentó una metodología que realiza evaluaciones tanto superficiales como estructurales. El primer caso se basa en un catálogo de fallas del tipo de fisuras, que se relevan en un área restringida de la superficie de rodadura y en el entorno al lugar donde se realiza la evaluación estructural²². Debido a que las medidas de deflexiones se realizan en puntos equidistantes, mínimo tres por kilómetro, las fallas a relevar corresponderán a un sector similar comprendido 30 m adelante y 30 m atrás del punto de evaluación estructural efectuada, los cuales son escasos para una información completa del pavimento.

La Figura 6.1 presenta el catálogo de fallas empleado por el método mencionado. Las fallas encontradas en la superficie de rodadura se califican mediante un código alfanumérico. El número indica el tipo de falla y la letra indica la magnitud. Así, una fisura “2E” corresponde a una fisura longitudinal de magnitud escasa, mientras que una “8S” corresponde a una fisura tipo “piel de cocodrilo” de magnitud severa.

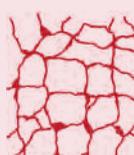
Catálogo de fallas de pavimento Tipo: Fisuras		
Figura Tipo		
Descripción	Fisura formada en una sola línea, generalmente longitudinal y aislada con tendencia a ramificarse.	Fisura ramificada con tendencia a formar una malla generalizada en sectores de pavimentos.
Coefficiente asociado	2	4
		
Fisura en forma de malla que abarca una superficie más amplia de pavimento y con tendencia a formar la “piel de cocodrilo”.	Fisura generalizada en forma de malla cerrada de reticulado más chico formando la llamada “piel de cocodrilo”. Desprendimiento de material en correspondencia con algunas fisuras.	Fisura totalmente generalizada con desprendimiento de panes de material y formando baches.
6	8	10
Nota: La magnitud de las fisuras se definen como E = escaso; M = moderado y S = severo (ej.: 2E,6M,8S)		

Figura 6.1 Adecuación del catálogo de fallas (CONREVIAL)

²² Cfr.: CONREVIAL

Si las medidas se realizan en número de tres por kilómetro como mínimo, la información que se deja de relevar supera largamente a las áreas evaluadas. Un detalle adicional se aprecia cuando las fallas identificadas son registradas en los formatos de evaluación, sin considerar el área afectada con dicho problema. Si las fallas no se logran medir, entonces no se podrá determinar el presupuesto de obra con la precisión que exigen los proyectos de rehabilitación.

Además, se debe considerar que los especialistas en costos y presupuestos, en la mayoría de los casos, no visitan la zona de proyecto y solo se basan en los datos informados por el especialista de campo. En este método se suman dos deficiencias, aquella en la cual se deja una gran área sin evaluar y aquella que no logra definir el metrado. Por lo tanto, los resultados del relevamiento de fallas no son confiables y los costos de mantenimiento y presupuesto de obra se verán afectados por adicionales, que definitivamente llegarán a la Contraloría General de la República (CGR) por exceder los porcentajes máximos permisibles.

6.2 ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO (PCI)

El Índice de la Condición del Pavimento (PCI)²³ se basa en un catálogo compuesto por 19 tipos diferentes de fallas, que establecen mejores valores en la evaluación. Las recomendaciones del PCI indican que luego del reconocimiento de la carretera a evaluar se determine un sector representativo del cual se elegirán 100 metros lineales, el mismo que será exhaustivamente evaluado para determinar las fallas y sus respectivas densidades. El método por lo tanto registra el tipo de falla y el área ocupada por esta.

El método del PCI fue desarrollado por M. Y. Shahin y S. D. Khon y publicado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos en el Reporte Técnico M-268 (1978) en su primera versión actualizada en el reporte TM5-623. El método permite evaluar la condición estructural y de superficie (operacional) en una sección de pavimento, con fines de determinar las actividades de mantenimiento y reparación. Además, determina el comportamiento de la estructura mediante evaluación continua del PCI a lo largo del tiempo según la ecuación:

$$PCI = 100 - \left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{mi} VD(T_i, S_j, D_{ij}) \right] * F$$

²³ Cfr.: Jugo Burguera

El grado de deterioro o valor de deducción de un pavimento, expresado en porcentajes, es función del tipo de falla encontrado, de su severidad (S) que esta falla presenta y de la densidad (D) según el área que ocupa la falla en la superficie evaluada.

Una evaluación puede presentar “i” tipos de falla de “j” grado de severidad. De estas fallas podrán presentarse un total de “p” número de fallas en el pavimento analizado. Las fallas pueden presentar magnitud leve, moderada o severa y para ello “mi” será el grado de severidad para la falla “i”. Finalmente “F” corresponde a un factor de ajuste, en función a las fallas representativas que realmente aportan a la degradación del pavimento.

El diagrama de flujo que se presenta en la Figura 6.2 muestra esquemáticamente los pasos necesarios para determinar el PCI, según la escala gráfica de valores asociados a un comportamiento del pavimento.

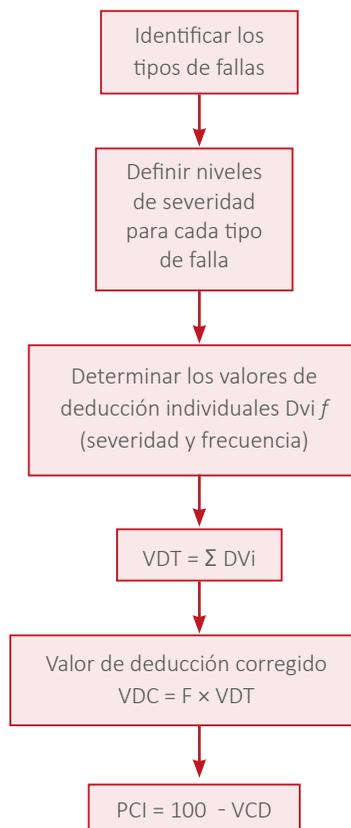
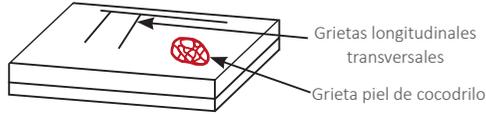


Figura 6.2 Diagrama de flujo del método del PCI

PASOS PARA EL CÁLCULO DEL PCI

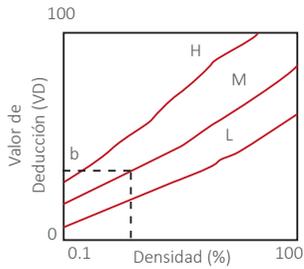
PASO 1

Inspección del pavimento
Tipos de fallas y severidad
Determinación de densidad



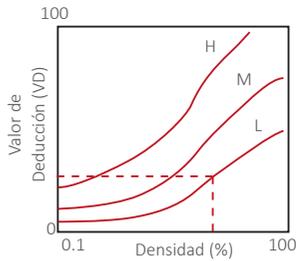
PASO 2

Determinación de los valores de deducción



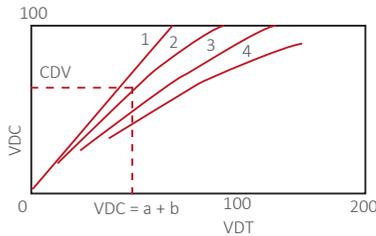
PASO 3

Cómputo del valor total de deducción: $VDT = a + b$



PASO 4

Ajuste de valor total deducido



PASO 5

Índice de condición de pavimento: $PCI = 100 - VDC$

PASO 6

Determinación de la condición del pavimento

PCI	Condición
100	EXCELENTE
86	MUY BUENA
70	BUENA
55	REGULAR
40	MALA
25	MUY MALA
10	FALLIDO
0	FALLIDO

Existen dos procedimientos para realizar la inspección del pavimento. En ambos casos se debe dividir la sección del pavimento en unidades de áreas trabajables, pudiendo ser 225 m² cada una si el tamaño de trabajo lo permite y corresponde a los 100 ml referenciado en el método.

El primer procedimiento requiere evaluar todas las unidades en las que ha sido dividido el sector; el segundo, tan solo evalúa la muestra escogida aleatoriamente. Cada unidad es cuidadosamente inspeccionada y los datos referentes a cada tipo de falla son anotados en una planilla de evaluación.

La inspección de todas las unidades de una sección resulta costosa y requiere de mayor tiempo y recursos. El método puede contemplar un plan de muestreo estadístico para determinar el PCI mediante la inspección de una muestra de la sección sin producir pérdida significativa en la precisión. El número mínimo de unidades a ser evaluadas (n) se determina mediante la ecuación siguiente:

$$n = N \frac{\sigma^2}{(e^2 / 4(N - 1) + \sigma^2)}$$

Donde:

n : Número de unidades de muestras a evaluar

N: Número total de unidades de muestras en la sección (mínimo 5 unidades)

e : Error permisible en determinación del PCI (recomendable 5 puntos del PCI)

σ : Desviación estándar del PCI en las unidades de la sección (si se desconoce úsese inicialmente $\sigma = 1.0$).

La ecuación provee un 95 % de confianza en el que el PCI estará dentro de +/- "e" del valor real, cuando se emplea un número n de muestras. El valor mínimo de "N" es 5 unidades.

Por ejemplo, una sección de carretera de 3 km, de longitud, y 7.30 m de ancho se puede dividir en 100 secciones de 30 m, c/u. Si se desea determinar el PCI con error de +/- 5 %, debe evaluarse, según la ecuación, un mínimo de 14 secciones.

Una vez determinado el número de unidades a ser evaluadas, estas deben escogerse empleando uno de los dos procedimientos sugeridos por el método. Para el mismo ejemplo antes indicado, esto sería:

- Dividir el total de unidades (100) en 7 grupos iguales o similares. En este caso, 6 secciones de 14 unidades y una de 16, o 5 de 14 y 2 de 15. Luego, se escogen aleatoriamente 2 unidades de cada grupo para un total de 14. Igualmente, pudieran formarse 14 grupos y escoger aleatoriamente una sección de cada grupo.
- El segundo procedimiento denominado “sistemático” consiste en evaluar unidades uniformemente espaciadas, siempre que la primera sea escogida aleatoriamente. Por ejemplo, se escoge la primera unidad entre 1 y 7, digamos 5, y de esta forma se evalúan la 5, 12, 19, 26, etc., hasta completar las 14 sugeridas.

Existe una variedad de catálogos de fallas y sistemas de evaluación propuestos por diferentes instituciones. Para la determinación del valor del PCI, se desarrolla el método empleando el catálogo mostrado en la Tabla 6.1, que muestra el número de falla, el nombre de la falla y la unidad empleada para el relevamiento. En este caso se deberá respetar la numeración asociada a la falla, que permitirá efectuar un proceso computarizado.

El relevamiento registra información obtenida del campo y de la inspección visual. Estas características corresponden a:

- Tipos de falla: Cada falla en el pavimento evaluado debe ser clasificada dentro de los distintos tipos de falla descritos en el método y según se muestra en el catálogo.
- Severidad de falla: En vista de las variaciones de severidad que presentan los tipos de fallas se han descrito los diferentes niveles contemplados en el método para cada una de ellas.
- Valor de deducción: Estos valores (VD) son determinados en función del tipo de falla, su severidad y la densidad en el pavimento.

Tabla 6.1 Catálogo de fallas para el método del PCI

FALLA N.º	DESCRIPCIÓN	UNID.
1	Grieta piel de cocodrilo	m ²
2	Exudación de asfalto	m ²
3	Grietas de contracción (bloque)	m ²
4	Elevaciones - hundimiento	m
5	Corrugaciones	m ²
6	Depresiones	m ²
7	Grietas de borde	m
8	Grietas de reflexión de juntas	m
9	Desnivel calzada - hombrillo	m
10	Grietas longitudinal y transversal	m
11	Baches y zanjas reparadas	m ²
12	Agregados pulidos	m ²
13	Huecos	Nº
14	Cruce de rieles *	m ²
15	Ahuellamiento	m ²
16	Deformación por empuje	m ²
17	Grietas de deslizamiento	m ²
18	Hinchamiento	m ²
19	Disgregación y desintegración	m ²

* Reemplazar por acceso de puentes, pontones y rejillas de drenaje
Fuente: PCI, USACE.

El valor del PCI de la sección del pavimento se obtiene determinando el promedio de los valores de las unidades evaluadas. Los pasos a seguir para determinar el valor del PCI de cada unidad son:

1. Determinar los datos correspondientes a cada tipo de falla (severidad y frecuencia) y su forma de medición.
2. Determinar los valores de deducción (VD) para cada falla y severidad mediante las figuras que presenta el método.
3. El valor total de deducción (VTD = Sumatoria de DV) es corregido para obtener VDC (valor de deducción corregido).
4. Finalmente el $PCI = 100 - VDC$.

Un factor de ajuste permite corregir el valor total de deducción cuando más de un tipo de falla afecta sustancialmente la condición del pavimento. El método presenta curvas empleadas para determinar el valor de deducción corregido (VTD) para un “q”, que corresponde al número de VD individuales mayores que 5.

Cada unidad inspeccionada y los datos correspondientes a cada tipo de falla son anotados en la planilla mostrada en la Figura 6.3 sobre la planilla de cálculo del PCI. Se indica la escala de valores del PCI y sus significados, que permiten tomar acciones sobre la estructura evaluada.

		3	10	1	7	13		
		7M	4L	8L	5L	1L		
		4M	10L					
		4M	6M					
		5L	3L					
TOTAL	BAJA(L)	5	20	8	5	1		
	MEDIA (M)	15	6					
	ALTA (H)	-	-					

Cálculo del PCI				
Tipo de falla	Densidad	Severidad	Valor de deducción	
3	2.38	L	2	PCI = 160 - VDC $\frac{66}{}$ CONDICIÓN DEL PAVIMENTO BUENA
3	7.14	M	14	
10	9.52	L	7	
10	2.88	M	8	
1	3.81	L	22	
7	2.58	L	3	
13	0.48	L	12	
VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN			58	
VALOR DE DECUCCIÓN CORREGIDO (VDC)			34	

Figura 6.3 Planilla de cálculo del PCI

6.2.1 INTERPRETACIÓN DEL PCI

El método del PCI, según recomendaciones de la USACE, no requiere de la evaluación total de la vía. Debido a sus carreteras de buena servicia-bilidad, se considera implícitamente que son carreteras estructuralmente homogéneas, construida y mantenida adecuadamente y, por lo tanto, la elección del sector a evaluar es tan representativo como cualquier otro.

En cambio para las condiciones de las carreteras en el Perú, es recomen-dable evaluar la totalidad del área superficial de la carretera en estudio, es decir, todo el ancho de la plataforma por toda la longitud. De esta ma-nera, se evita perder información importante para la determinación del presupuesto de mantenimiento de obra. La primera aplicación se realizó en el año 1990²⁴ en contrato de servicios con la entonces Unidad Ejecu-tora de Proyecto (UEP) y para evaluar los puntos críticos de la carretera Panamericana Sur.

La aplicación del método del PCI proporcionó resultados tan cercanos a la realidad que no hubo adicionales en los trabajos de mantenimiento ejecutados por el contratista. Se evitó el engorroso trámite de adicionales que es muy común. La evaluación se puede realizar con grupos de dos personas y en número tal que cada uno de los grupos evalúen un prome-dio de cinco kilómetros. Cabe anotar que esta metodología proporciona metrados más cercanos a la realidad y que en un trabajo en paralelo, con varias brigadas, no demanda tanto tiempo dicha evaluación.

También permite el procesamiento computarizado de las fallas relevadas y finalmente información fidedigna para los profesionales de la especia-lidad de costos y presupuestos.

La alternativa más completa permite determinar el PCI de manera in-genieril y coherente. La Tabla 6.2 varía de las anteriores, porque pre-senta las posibles causas de la generación de fallas en la estructura del pavimento.

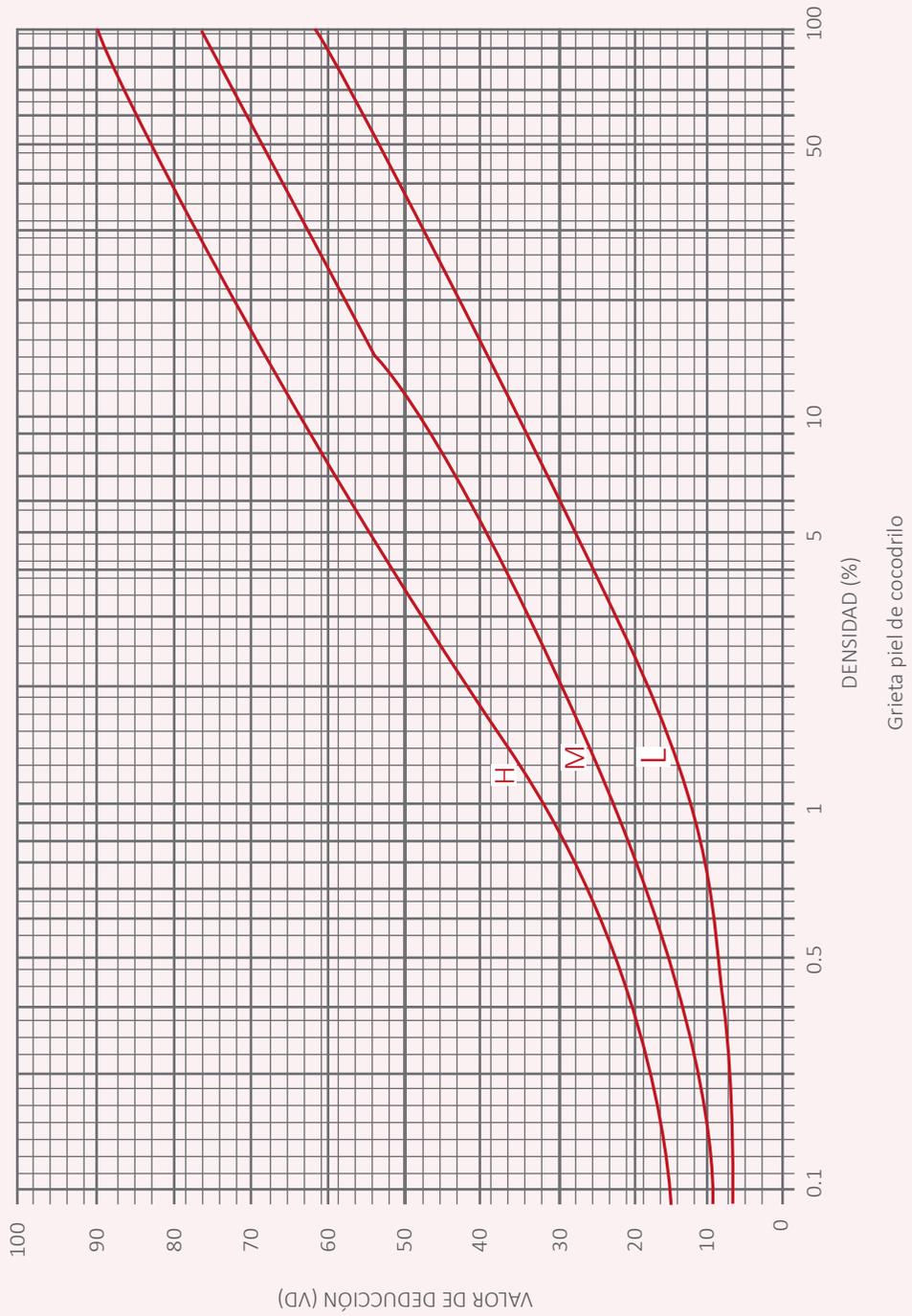
²⁴ Cfr.: Puntos críticos Panamericana Sur

Tabla 6.2 Causa principal de las fallas en la determinación del PCI

Fallas considerables en la determinación del PCI

Falla N.º	Descripción unidad		Causa principal		
			Tráfico	Clima	Materiales
1	Grieta piel de cocodrilo	m ²	✓		
2	Exudación de asfalto	m ²		✓	✓
3	Grietas de contracción (bloque)	m ²		✓	✓
4	Elevación - hundimiento	m ²		✓	✓
5	Corrugaciones	m ²		✓	✓
6	Depresiones	m ²		✓	✓
7	Grietas de borde	m		✓	✓
8	Grietas de reflexión de juntas	m		✓	✓
9	Desnivel calzada - hombrillo	m		✓	✓
10	Grietas longitudinal - transversal	m		✓	✓
11	Baches y zanjas reparadas	m ²	✓		
12	Agregados pulidos	m ²	✓		
13	Huecos	N.º	✓		
14	Cruces de rieles	m ²			
15	Ahuellamiento	m ²			
16	Deformación por empuje	m ²			
17	Grieta de deslizamiento	m ²		✓	✓
18	Hinchamiento	m ²			
19	Disgregación y desintegración	m ²			

La Figura 6.4 presenta como ejemplo dos de las 19 fallas que integran el método del PCI. Estas gráficas permiten encontrar los valores de deducción según la magnitud del tipo de falla encontrado. Se ingresa con la densidad o el porcentaje del área afectada, se levanta una vertical y se intercepta la curva correspondiente de severidad (baja, media o alta) y luego se sale hacia la ordenada encontrando el valor de deducción de la falla.



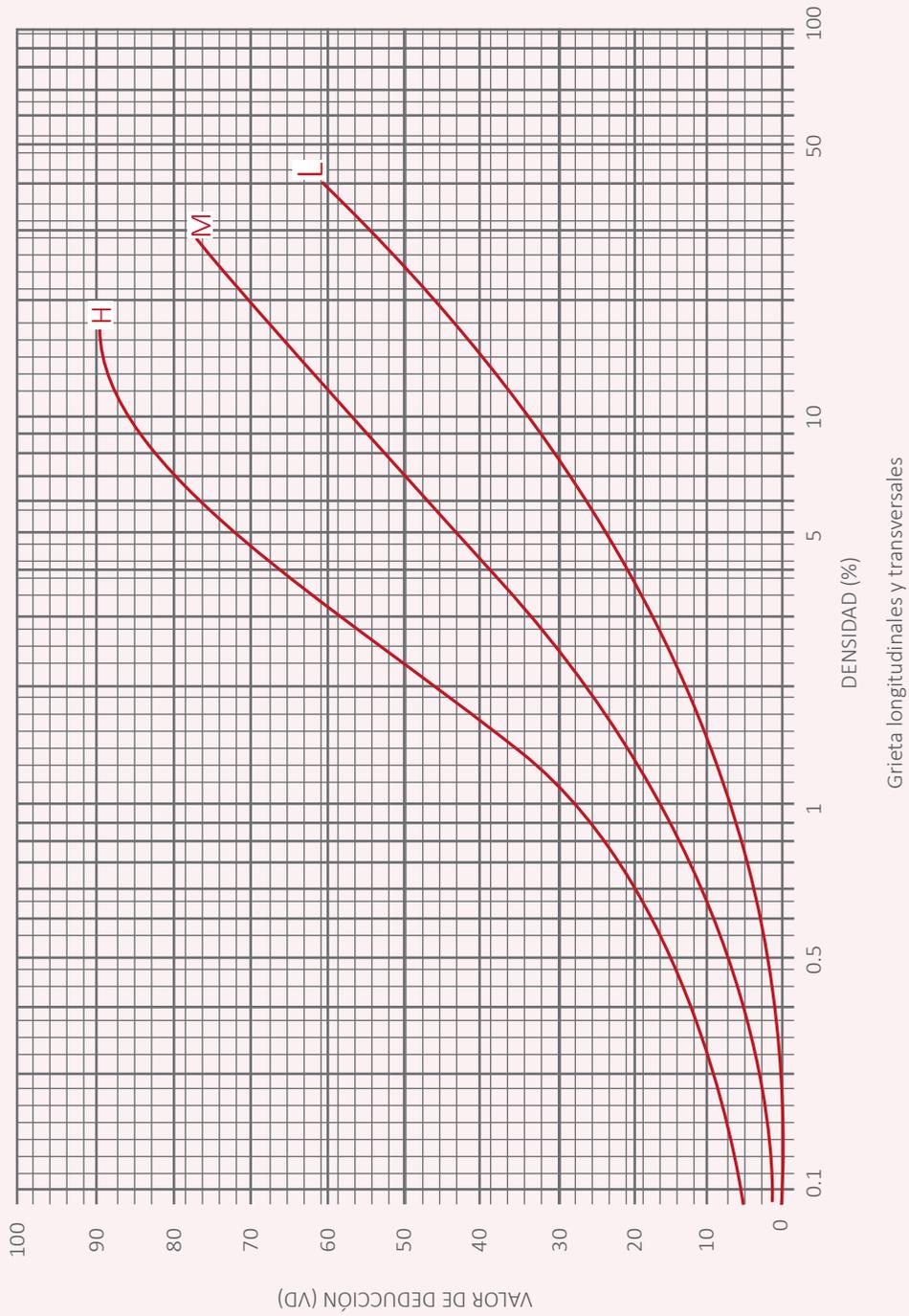


Figura 6.4 Ejemplo de gráficas de degradación según falla

La Tabla 6.3 presenta la condición del pavimento basado en el índice PCI hallado. Uno de los puntos más importantes es aquel señalado como PCI igual a 40, ya que corresponde al momento ideal para realizar las actividades de rehabilitación. En la gráfica de degradación del pavimento en el tiempo se genera una elevación del valor del PCI en la curva donde se detalló la degradación del pavimento.

Tabla 6.3 Interpretación de los valores de PCI y la condición del pavimento

PCI	Significado
100	Pavimento en "perfecto" estado.
70	Punto en que el pavimento comienza a mostrar pequeñas fallas localizadas, es decir, el punto en que deben iniciarse acciones de mantenimiento rutinario o preventivo menor.
55	Punto en que el pavimento requiere acciones de mantenimiento localizado para corregir fallas más fuertes. Su condición de rodaje sigue siendo "buena", pero su deterioro o reducción de calidad de rodaje (relación de deterioro) comienza a aumentar.
40	Punto en el que el pavimento muestra fallas más acentuadas y su condición de rodaje puede calificarse como regular o "aceptable", su rata de deterioro aumenta rápidamente. Este punto es cercano al definido como punto "óptimo" de rehabilitación.
0	El pavimento está fuertemente deteriorado, presenta diversas fallas avanzadas y el tráfico no puede circular a velocidad normal. El pavimento se considera "fallado" y requiere acciones de mantenimiento mayor y eventualmente reconstrucción parcial o bacheo de un alto porcentaje de su área.

Fuente: El autor.

6.3 EVALUACIÓN DE SUPERFICIE DE PAVIMENTO - PASER

El método Pavement Surface Evaluation and Rating (PASER), desarrollado en el Centro de Información del Transporte de la Universidad de Wisconsin, presenta un catálogo de fallas basado en una escala gráfica con categorías que varían entre 1 y 10, donde esta última corresponde a las mejores condiciones de calidad. No considera escalas intermedias que permita mayor sensibilidad para calificar la superficie dañada. La evaluación responde a los estándares con los que han sido diseñados los otros métodos.

La Figura 6.5 muestra características del catálogo en el cual se aprecia la escala gráfica con los rangos indicados y además se presenta parte del catálogo con ejemplo de una falla tipificada a un rango determinado. Estos modelos de fallas son contrastados en la evaluación superficial para determinar el estado total de la vía.

Asphalt-PASER Manual

Pavement Surface Evaluation and Rating

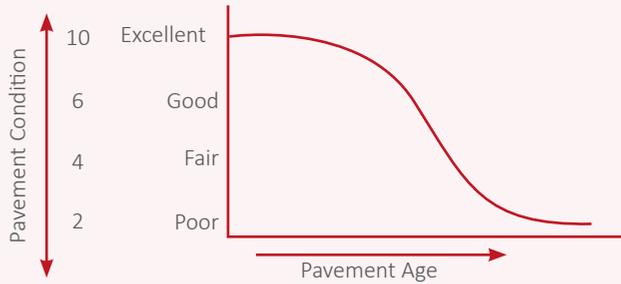


Figura 6.5 Formato empleado en el manual PASER

Como en la mayoría de los catálogos, se establece una relación de degradación luego de evaluar los pavimentos, a lo cual se le asocia una actividad correctiva. La Figura 6.6 muestra la curva de degradación a lo largo de los años debido a las fallas que se presentan progresivamente. Se aprecia que la condición del pavimento decrece con el tiempo. Los rangos varían en forma decreciente y establecen una calidad para el pavimento que varía entre excelente y pobre. Además, se muestra los rangos y las actividades recomendadas para obtener mejores condiciones superficiales.

Rating PAVEMENT SURFACE CONDITION

Using our understanding of surface distress, asphalt surface can be evaluated and rated. The rating scale ranges between "1" (very poor condition) to "10" (excellent condition). Most pavements will deteriorate through the phases listed in the rating scale. The time it takes to go an excellent (10) to a very poor condition (1) depends largely on the quality of the original construction and the amount of heavy traffic loading.



Once significant deterioration begins it is common to see pavements deteriorate rapidly. This is usually due to a combination of loading and the effects of additional moisture. As a pavement ages an additional cracking develops, more moisture can enter the pavement and accelerate the rate of deterioration.

Look at the photographs which follow and become familiar with the descriptions of the individual rating categories. To evaluate an individual pavement, first determine its general condition. Is it relatively new, toward the top end of the scale, or in very poor condition and at the bottom of the scale, or somewhere in between? Next, think generally about the appropriate maintenance method. Use the following categories:

- Rating 9 & 10- no maintenance required
 - Rating 7 & 8- routine maintenance, cracksealing and minor patching
 - Rating 5 & 6- preservative treatments (sealcoating)
 - Rating 3 & 4- structural improvement and leveling (overlay or recycling)
 - Rating 1 & 2- recons' ution
- Finally, review the individual pavement distress and select the appropriate surface rating.

Figura 6.6 Condición de la superficie y actividades de mantenimiento

6.4 PROPUESTA DEL MTC

Basado en los tipos de fisuras que planteaba el catálogo de fallas de CON-REVIAl, el MTC planteó la alternativa de emplear otras fallas como deformaciones, desintegraciones, entre otras, que permita realizar un relevamiento más completo de la superficie asfáltica.

La Tabla 6.4 presenta las alternativas de fallas que se asocian a la magnitud. Se tipifican como escasas, moderadas y severas. En este caso se establece un valor para identificar las magnitudes, luego de determinar las fallas. A pesar de la amplitud de fallas propuestas, no hace referencia al metrado que se requiere para determinar el presupuesto de obras de mantenimiento.

Tabla 6.4 Rangos para definir magnitud de fallas

Tipo	Falla	Magnitud		
		Escasa (e)	Moderado (m)	Severo (s)
DEFORMACIONES	Ahuellamientos (A) (medido con regla 1.20 m)	< 6 mm	6 a 12 mm	> 12 mm
	Hundimiento (H)	Solo depresión. No hay fisuras.	Depresión con fisura hasta tipo 6 o despla- zamiento en borde.	Fisuración Tipo 8 ó más desplazamiento borde, formación cordón.
	Desplazamientos/ Deslizamientos (D)			
	Ondulaciones/ Levantamientos Velocidad 60 km/h	No incluyen en la marcha. Localizado en zonas críticas.	Se aprecia al andar, pero por carácter localizado no resulta molesto.	Obliga a graduar velocidad sumamente molesta.
FISURACIONES	Longitudinal/ Transversal (LT)	2 Muy finos, < 1 mm	2 Mayor ancho fisura, > 1 mm	4 Con ancho fisura > 3 mm
	Ramificaciones (R)	4 Muy finos, < 1 mm	4 Mayor ancho fisura, > 1mm	4 Con ancho fisura > 3 mm
	Bloques (B)	6 Bloque anguloso de tamaño > 15 cm. Con anchura de fisura < 1 mm	6 Bloque anguloso de tamaño < 15 cm. Con anchura de fisura > 1 mm	6 Bloque anguloso de tamaño < 15 cm Con anchura de fisura > 3 mm
	Piel de cocodrilo (PC)	8 Bloque anguloso de tamaño > 15 cm. Con anchura de fisura < 1 mm	8 Bloque anguloso de tamaño < 15 cm. Con anchura de fisura > 1 mm	8 Bloque anguloso de tamaño < 15 cm Con anchura de fisura > 3 mm
	Idem. con Desintegración (PCD)	10 Gran degrada- cion en bordes.	10 Pérdida de bloques.	10 Hundimiento, tendencia o baches.
DESINTEGRACIONES	Peladuras Desintegración Superficial (P)	Visible, pero no afecta la marcha incipiente.	Marcha ruidosa.	Sensación de gran desposte en marcha profundos.
	Baches (B)	Solo superficial aislado.	Superficiales, pero formando equipos. Profundos aislados.	Profundo, agrupados obligan a variar velocidad y eludirlos.
	Desintegración de mezcla asfáltica (falta de adherencia) (D)	Separación de la mezcla en porciones.	Separación de la mezcla en porciones menores de 10 cm	Separación total de agregados.
	Exudaciones (E)	Aislado. Leve con huellas.	Huellas bien diferenciadas.	Extensivo en todo ancho calzado.
BERMAS	Bermas descalzadas (BD)	Resalto.	Resalto riesgoso.	Resalto muy riesgoso por erosión en bordes.
	Erosionadas (E)	Superficie muy irregular.	Marcada erosión en ambos bordes.	Inaceptable.

Las fisuras que presenta la tabla guarda correspondencia con el método de CONREVIAl donde cada dígito está asociado a una forma de fisuramiento, con las características indicadas anteriormente.

En trabajos realizados, para la rehabilitación de la carretera Panamericana Sur en el año 1991, se estableció el empleo de un relevamiento gráfico que proporcionaba una idea global del tramo evaluado. Sin embargo, es importante reconocer que, años después, esta forma de representación pudo correlacionar una idea equivocada del deterioro debido a que no se integra un porcentaje de participación de las fallas, es decir, existiendo una sola falla puede afectar el 90 % del área mientras que un grupo de fallas puede alcanzar una baja participación. La Figura 6.7 muestra las simbologías que representan a las fallas indicadas.

Clasificación Tipo principal de falla	Denominación de la manifestación	Símbolo
I. Deformaciones	1. Ahuellamiento	~
	2. Hundimiento (depresión)	∪
	3. Desplazamientos	∩
	4. Deslizamientos	~
	5. Ondulaciones	∩
II. Fisuras o agrietamientos	1. Piel de cocodrilo	##
	2. En bloque	##
	3. Longitudinales	—
	4. Transversales	∩
	5. Reflejadas	∩
	6. En arco	∩
III. Disgregaciones	1. Peladuras	⋯
	2. Nidos de gallinas	○
	3. Desintegraciones totales	●
	4. Indentaciones	≡
	5. Pulimento superficial	⋯
IV. Exudación	1. De asfalto	∩
Mantenimiento	1. Parchados o bacheo	■
	2. Sello	▤

Tabla 6.5 Catálogo gráfico de fallas en pavimentos

Fuente: El autor

6.5 DETERMINACIÓN DEL IRI Y EL PSI

La rugosidad del pavimento es el parámetro que relaciona la magnitud y frecuencia de sus irregularidades superficiales, con la comodidad o confort al transitar sobre este. No guarda relación con la textura, la apariencia o el acabado superficial de la capa de rodadura, sino más bien con las deformaciones que inciden en su perfil topográfico, como son las ondulaciones, los hundimientos, los ahuellamientos y los baches. Los fisuramientos tienen poca o ninguna incidencia en los resultados de rugosidad.

Los datos de rugosidad se obtienen mediante el uso de vehículos, al cual se les adaptan equipos simples o sofisticados. La Foto 6.1 muestra el equipo Bump Integrator (BI), fabricado por Leonard Farnell & Co. Ltd. de Inglaterra. El instrumento registra los desplazamientos acumulados del eje respecto al “chasis” del vehículo, datos que luego son correlacionados a la rugosidad o irregularidad superficial del camino.

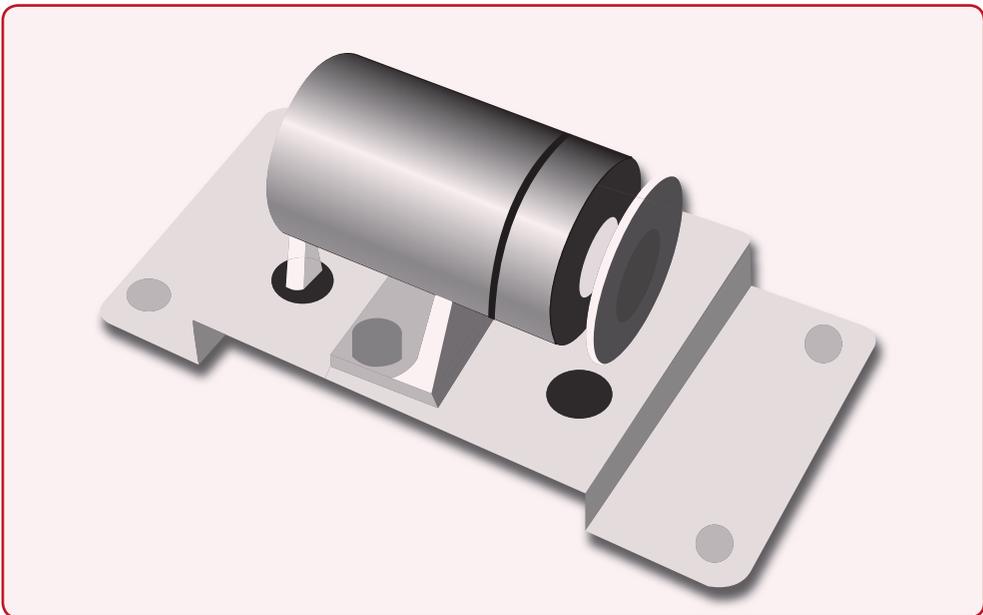


Figura 6.7 Equipo de medición de rugosidad Bump Integrator

Fuente: El autor.

El sistema está formado por un vehículo liviano, donde el eje trasero está conectado al Bump Integrator, el cual acumula los movimientos del eje trasero a lo largo del viaje. Los datos son inmediatamente registrados por el contador de unidades BI para su posterior análisis.

Debido a que el sistema registra todas las variaciones de cota que pudieran encontrarse en el perfil longitudinal, la medición de rugosidad está directamente relacionada con las irregularidades que se presentan en la superficie de rodadura. Esta rugosidad es el parámetro principal para determinar el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI), expresando el deterioro de la vía. De acuerdo a la AASHTO, la serviciabilidad es la capacidad de un pavimento que asegura una circulación suave, confortable y segura para el tránsito. Por ello, su apreciación depende del usuario, de las características propias del vehículo, de la velocidad de operación y de la condición del pavimento.

El estado superficial de rodadura asfáltica, según los valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), se clasifica de acuerdo a la Tabla 6.5.

Tabla 6.6 Estado superficial en función al IRI

Índice de rugosidad internacional (IRI)	Estado superficial
< 3	Bueno
3 – 4	Regular
4 – 6	Malo
6 – 10	Pésimo

Fuente: El autor.

La determinación analítica de la rugosidad se ha efectuado utilizando la expresión aproximada establecida por Sayers, que relaciona la rugosidad con el índice de serviciabilidad. Esta correlación se desarrolló usando los datos obtenidos en el ensayo internacional sobre rugosidad de caminos, realizado en Brasil en 1982, determinando la expresión:

$$R = 5.5 \ln (5.0/PSI)$$

Donde:

R : Rugosidad en IRI (International Roughness Index en m/km)

PSI : Índice de serviciabilidad presente

La transitabilidad de la vía o su calificación de calidad del servicio que brinda en un momento determinado se evalúa en función de los valores de PSI calculados.

Para obtener la calibración del instrumento Bump Integrator, se ensayan diferentes tramos con el método nivel-mira. Esta metodología requiere como primer paso identificar por lo menos cinco a seis secciones de vía, con condiciones diferentes del pavimento, entre muy buena y asfaltada, hasta muy mala y sin asfalto. Las secciones deben tener entre 200 a 300 m de longitud. Se nivela cada 250 mm en las primeras seis secciones y cada 100 mm en la última sección. Luego, se realizan recorridos, entre 3 y 10 repeticiones, sobre dichas secciones utilizando el vehículo donde se instaló el rugosímetro. Finalmente, se procede a una labor computarizada de correlacionar las medidas obtenidas con el rugosímetro (BI), con los resultados de la nivelación topográfica de cada sección respectivamente, obteniéndose la ecuación de calibración siguiente:

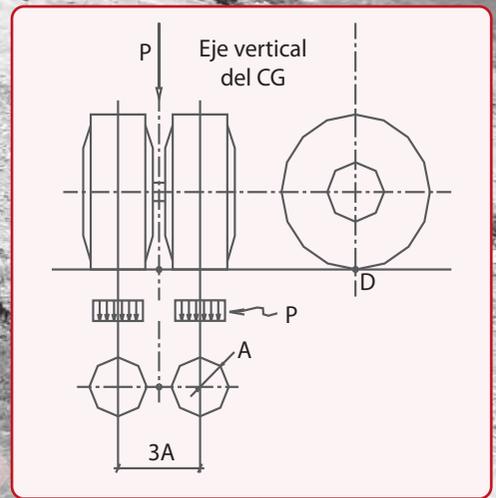
$$IRI = 0.0258 (BI_{prom}) + 1.57$$

Los valores obtenidos permiten establecer parámetros estadísticos como el IRI máximo, mínimo, promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.

Capítulo

7

Evaluación estructural



ABET	K	H
	70	30

Logros:

Aplica métodos no destructivos de evaluación estructural del pavimento. Interpreta resultados y plantea alternativas de solución con fines de diseño o refuerzo. Reconoce la existencia de programas de rehabilitación y de gerencia de inversión en los pavimentos, que permita una distribución racional de las inversiones.

TEMARIO:

- Método de ensayos no destructivos
- Método empírico y matemático
- Conceptos del análisis de rehabilitación (SARP) y gerencia de inversión (GIP)

INTRODUCCIÓN

Las evaluaciones estructurales del tipo no destructivo, mediante la aplicación de la Viga Benkelman, eran obsoletas a inicios de los años ochenta, pero se debieron emplear porque la adquisición de un equipo más moderno demandaba una inversión mayor a los cien mil dólares.

Las recomendaciones para la aplicación de este equipo se basa en métodos empíricos que a partir de dos lecturas de deflexiones distanciadas en 0.25 m, se puede establecer la parábola de deformación del pavimento y, por lo tanto, asociar a un círculo inscrito evaluado a partir de su radio curvatura. Las soluciones se establecen a partir de la comparación de radios y deflexiones máximas, las mismas que arriesgan alternativas para la solución definitiva.

A partir de la segunda mitad de los años 80 y luego de los trabajos realizados por la asociación Louis Berger y Lagesa, se introdujo la evaluación de pavimentos mediante métodos matemáticos basados en modelos elásticos y para lo cual se requiere más de dos lecturas de deflexiones. Un detalle importante del método es el algoritmo que presenta para determinar el valor de CBR. Sin embargo, este no se vincula con los tipos de suelos.

De estos métodos tradicionales el análisis de las deflexiones solo puede reconocer comportamientos estructurales homogéneos. No es seguro que el uso de valores numéricos sea empleado como insumos de diseño. Es útil para el sectorizado de las vías que permita diseños particulares.

7.1 MÉTODO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los trabajos de rehabilitación de carreteras demandan evaluaciones del tipo no destructivo (END), las mismas que durante los últimos años se han desarrollado empleando la Viga Benkelman. Este equipo puede presentar uno o dos aguilonos o brazos. Se debe tener en cuenta la relación de brazos de palanca de los aguilonos y la aproximación de lecturas de los diales empleados.

Con el tiempo se ha podido apreciar que los valores de deflexiones obtenidos en diferentes trabajos no pueden ser empleados directamente en el diseño debido a la mala valoración de la estructura, especialmente cuando la evaluación está asociada al método elástico en el cual se emplea el modelo de Hogg, que evalúa el sistema compuesto por pavimento y subrasante, sin importar

la composición de capas del pavimento. Uno de los parámetros de diseño es el referido al valor de capacidad de soporte o California Bearing Ratio (CBR), determinado por un algoritmo muy general sin discriminar el tipo de subrasante.

Una inadecuada determinación de los parámetros de diseño refleja una estructura infradiseñada, requiriendo de trabajos de mantenimiento al poco tiempo de servicio o, por el contrario, un sobredimensionamiento de la estructura, hace antieconómica la obra. Sin embargo, se debe considerar que las evaluaciones deflectométricas ayudan grandemente al proyectista porque permite, mediante un deflectograma, el sectorizado de la vía según su comportamiento estructural homogéneo, adoptándose una alternativa de solución para cada sector determinado.

Los END empleando la Viga Benkelman determinan deformaciones del pavimento frente a las solicitaciones de carga provenientes de un vehículo cargado. En 1983, durante los primeros trabajos de rehabilitación en el país, este equipo era considerado obsoleto para la toma de lecturas de deformaciones, pero equipos más sofisticados demandaban un costo por encima de los 100 000 dólares, tal es el caso del equipo Falling Weight Deflectometre (FWD) y que el MTC no podía adquirir en aquel entonces.

En los términos de referencia del concurso de méritos, que presenta el MTC, demandan evaluaciones con estos equipos y el empleo de sus metodologías. En últimas convocatorias solicitan innovaciones como el equipo FWD, empleado en 2000, en la carretera Piura – Paita y Piura – Sullana – Macará²⁵. Cabe anotar que estas medidas dinámicas tuvieron que ser transformadas a estáticas para satisfacer las exigencias del MTC, a pesar de corresponder a una metodología más adelantada.

La Viga Benkelman de brazo doble fue utilizada en el país en 1981 y sus resultados se procesaron mediante el método empírico. Con dos puntos de deflexiones distantes 25 cm, se establece la parábola de la deformada. En ella se inscribe un círculo cuyo radio de curvatura (R_c) representa una longitud ficticia y mediante la interpretación de este valor la deflexión máxima en el origen (D_o) y la deflexión característica (D_c). Luego, se tipifica la respuesta en cinco casos. De estos casos, solo uno indica que las deflexiones halladas pueden ser utilizadas para calcular el refuerzo a colocar. Los otros cuatro ca-

²⁵ Cfr.: BCEOM- OIST

Los autores recomiendan el uso de métodos tradicionales, como el método AASHTO. Este proceso que demanda la recopilación de una gran cantidad de datos puede verse desestimado al no cumplir las exigencias de los R_c , D_o y D_c . Un aspecto importante es tener en consideración el deflectograma con fines de sectorizar la carretera que se está evaluando, e inclusive no se debe tomar en cuenta los valores numéricos obtenidos de la evaluación y por el contrario se debe tomar como curvas interactivas de las cuales se realizan las interpretaciones necesarias para dividir en sectores de comportamiento estructural homogéneo.

Se puede concluir que estos trabajos permiten establecer la respuesta de la estructura del pavimento frente a las solicitaciones de cargas. Los resultados proporcionados no son del todo confiables para los diseños. La deflectometría, por ejemplo, permite detectar sectores de comportamiento homogéneo, logrando definir un diseño estructural para cada uno de estos sectores definidos. Sin embargo, no se puede decir mucho sobre los valores de CBR hallados a pesar de su empleo indiscriminado. Los CBR obtenidos cuentan con un algoritmo que proporciona valores bajos entre 5 y 15, los cuales corresponden a suelos arcillosos, limosos, arenas finas o una combinación de estos.

Si la carretera se ubica en zonas de altiplanicie, ceja de selva o selva, entonces se puede concluir que los valores son representativos de las condiciones naturales de los suelos por simple coincidencia. Por otro lado, en las zonas de sierra baja y costa se obtienen valores similares de CBR sin discriminar la zona en la que se encuentre la vía evaluada, por los valores que discrepan de la resistencia de los suelos. Es un error mayor si se emplean estos valores como insumos para la determinación de la capa de refuerzo. Este problema se agudiza cuando se emplean programas de cómputo que procesan las deflexiones y calculan valores dependientes de los módulos de elasticidad. El deflectograma permite interpretar la homogeneidad estructural de la vía evaluada, haciendo muy limitado los alcances de las evaluaciones deflectométricas.

7.1.1 DEFLECTOMETRÍA MÉTODO EMPÍRICO

Los trabajos para evaluar estructuralmente los pavimentos están referidos a determinar las características mecánicas de las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento y su comportamiento integral con respecto a los suelos de cimentación o subrasante. Se diferencian dos tipos de ensayos, los no destructivos (END) y los destructivos (ED). Estos últimos, los más conocidos, corresponden a la ejecución de las calicatas en la plataforma para determinar espesores de las capas constituyentes de la estructura, así como de sus resistencias mediante ensayos en el laboratorio.

Los END empleados en el país en los últimos 20 años, se han ejecutado con el deflectógrafo tipo Viga Benkelman según el procedimiento canadiense Canadian-Goad Road Association (coincidente con el Instituto del Asfalto) que determina la deflexión elástica del pavimento. Este equipo determina deformaciones del pavimento frente a las solicitaciones de carga provenientes de un vehículo cargado. La Foto 7.1 y la Figura 7.1 muestran las ruedas duales de un eje trasero de un vehículo que transmite una carga de 8.2 toneladas y el equipo Viga Benkelman posicionado para efectuar las mediciones de deformaciones.



Foto 7.1 Medición de deflexiones con Viga Benkelman

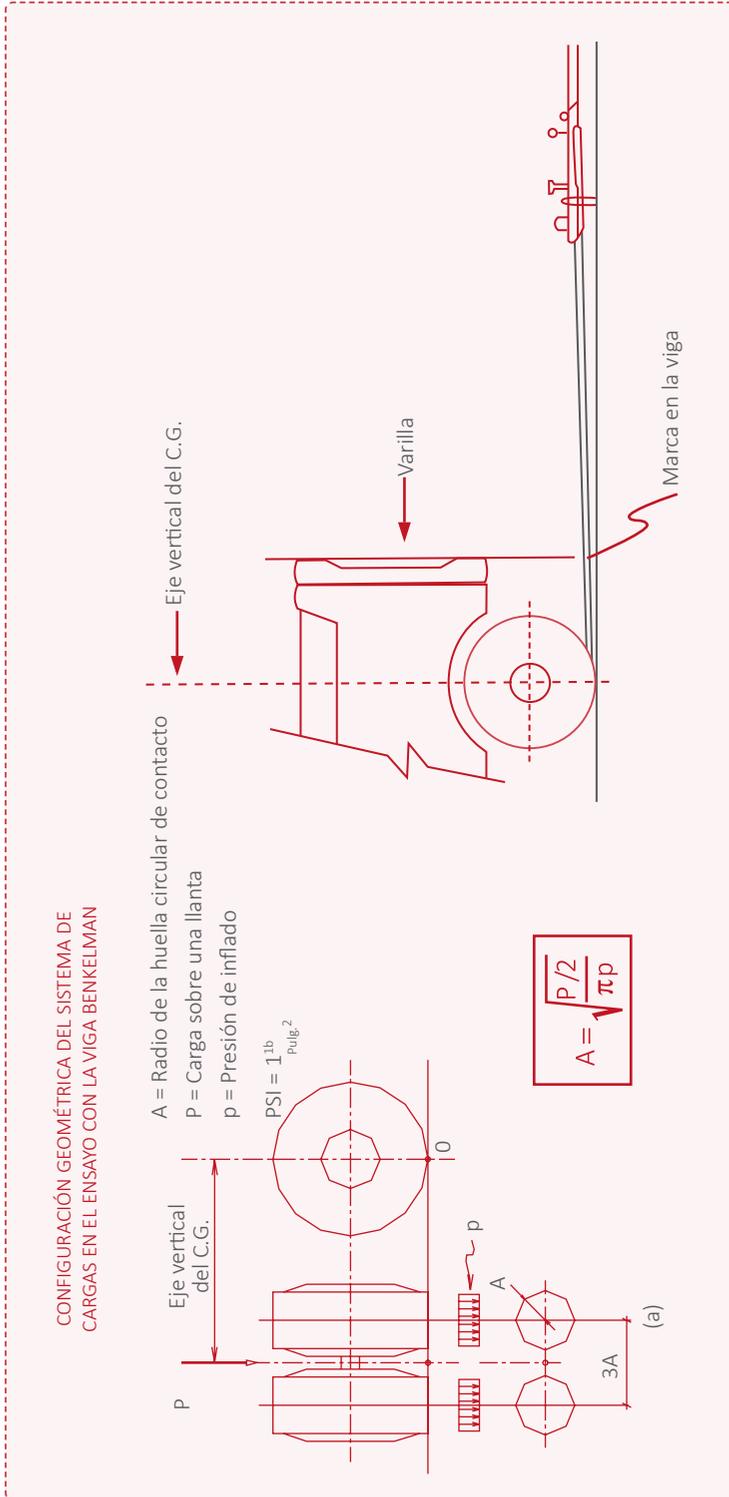


Figura 7.1 Esquema de la transmisión de carga y equipo medidor de deformaciones

La viga de brazo doble y su método empírico²⁶ genera una deformada del tipo parábola. La Figura 7.2 muestra la deformada y el círculo inscrito de radio de curvatura (R_c).

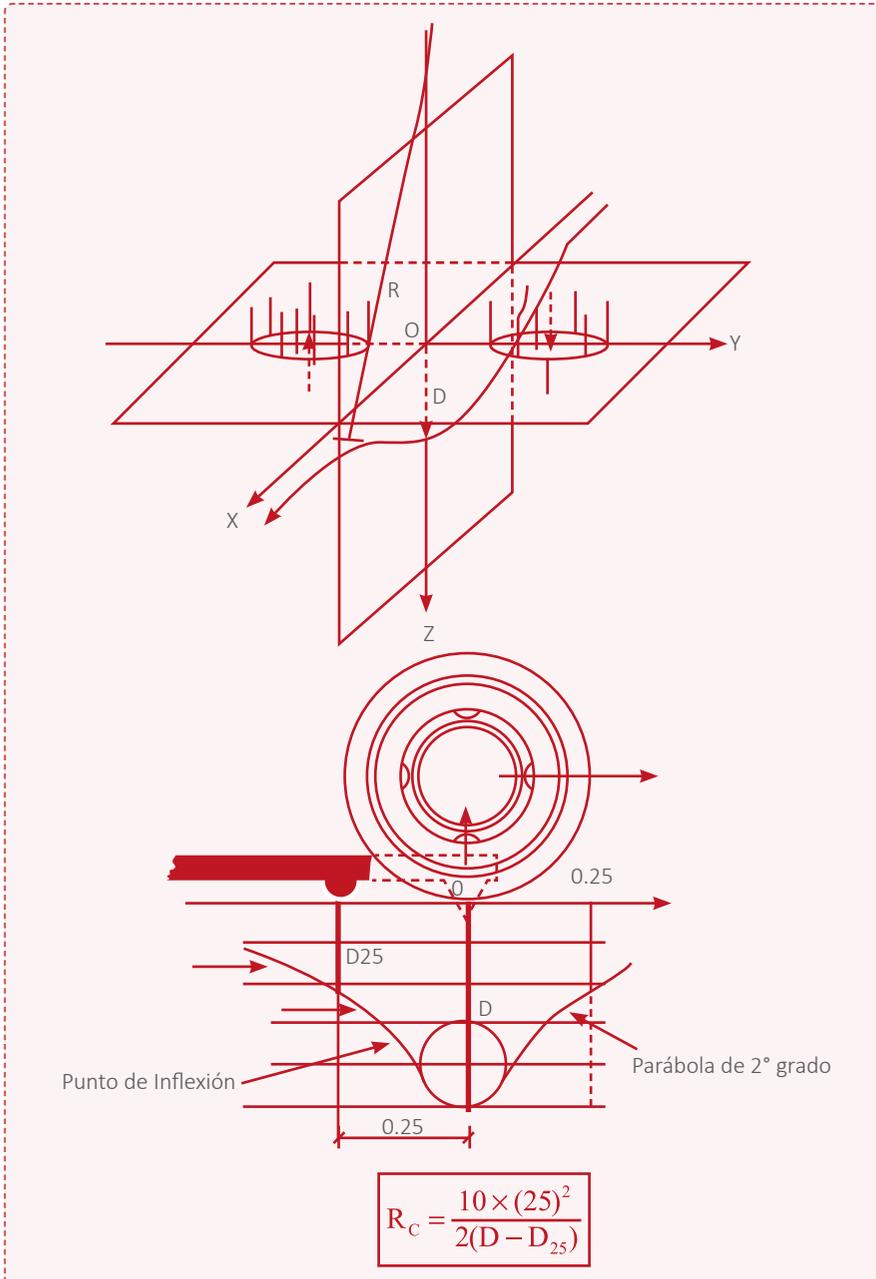


Figura 7.2 Deformada del pavimento y parámetros de comparación

²⁶ Cfr.: CONREVAL

7.1.2 DEFLECTOMETRÍA MÉTODO MATEMÁTICO

Para los modelos matemáticos, la interpretación de deflexiones que se integran para definir la deformada de la superficie del pavimento se realiza con una Viga Benkelman de brazo simple, de la cual se registran cinco lecturas en el dial de deformación para una sola estación²⁷. Los valores se integran atendiendo modelos matemáticos de Hogg. Se establecen módulos de elasticidad de la parte estructural del pavimento y del material de subrasante. Las comparaciones se efectúan hasta llegar a especular la capacidad de soporte de la subrasante o determinar el valor de CBR.

Las deflexiones determinadas deben ser corregidas por temperatura de la carpeta asfáltica al momento de la medición para llevarla a la estándar de 20 °C. La dirección de vías de Argentina propone:

$$D_{20} = D_t / k (t - 20^{\circ}) e + 1$$

Donde:

D_{20} : Deflexión corregida a la temperatura estándar de 20 °C (1/100 mm)

D_t : Deflexión medida a la temperatura t (1/100 mm)

k : 1×10^{-3} ; constante para capas granulares (1/ cm °C)

t : Temperatura de la carpeta asfáltica del pavimento (°C)

e : Espesor de la carpeta asfáltica (cm)

La recolección de datos se efectúa de manera ordenada y en ubicaciones equidistantes a lo largo de un carril. Sabiendo que la evaluación debe abarcar ambos carriles es conveniente que las mediciones del otro carril se realicen desfasadas en la mitad de la longitud propuesta. De esta manera, se habrá registrado mayor información en secciones más próximas. La Figura 7.3 presenta los formatos de recolección de datos, en donde además de registrar las lecturas de deflexiones, se ha tomado lecturas de las fisuras, espesor de la carpeta asfáltica, ahuecamiento y observaciones de apoyo para la interpretación final.

Además, se presenta la salida del programa de procesamiento de datos en la cual se determinan las deflexiones corregidas y los radios de curvatura. Es importante notar la escala de color innovada tipo semáforo colocada en el extremo de la salida de datos procesados, correlacionando los resultados de radios de curvatura y los rangos de variación de estos para fines de sectorizado o interpretación estructural. Los resultados de Rc, comprendidos entre 300 m y 800 m, presentan color verde; mientras que los valores menores de 300 m, de color amarillo y mayores de 800 m de color rojo.

²⁷ Cfr.: Berger- Lagesa

GHAMA Ingeniería S.A.

 Geotécnica e Hidráulica / Asesoramiento
y Mantenimiento

FORMATO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

 Proyecto : Evaluación Estructural de la Vía
Solicitante Expresa : CONALVIAS
Operador : N.N.V.

 Fecha : 19 - 04 - 07
Equipo : Viga Benkelman / Rel. 4:1 / Lx10-2 :
Responsable : W.G.L.

N	Progresiva	Fisura	Ahue.	CA (cm)	T°C	L0	L25	L40	L100	Lf	Observación
1	0+000	-	-	6	47	40	39	37	33	28	Inicio en Av. República de Panamá
2	0+050	-	-	5.0		40	39	38	37	35	
3	0+100	2M	-	9.0	49.4	40	38	32	27	8	
4	0+150	-	-	7.0	31.4	40	37	34	32	23	
5	0+200	2L	-	9.0	46.5	40	39	34	26	17	
6	0+250	2L	5	7.0	31.2	40	39	37	35	31	
7	0+300	-	-	5.0	43.4	40	39	36	31	24	
8	0+350	-	10	5.0	32.8	40	39	36	34	32	
9	0+400	2M	-	7.0	45.6	40	39	36	33	27	
10	0+450	4M	18	4.5	32.0	40	39	37	36	31	
11	0+500	8M	-	5.5	49.6	40	39	36	31	24	
12	0+550	4L	6	4.5	36.2	40	39	37	36	35	
13	0+600	2L	-	6.3	49.6	40	38	34	28	21	
14	0+650	6L	-	7.0	32.1	40	37	32	29	24	
15	0+700	2M	2	7.5	47.0	40	38	34	29	24	
16	0+750	6M	11	6.5	34.5	40	39	36	35	30	
17	0+800	-	35	-	5	-	-	-	-	-	
18	0+850	-	-	7.0	33.8	40	38	36	34	31	
19	0+900	-	-	5.5	45.7	40	37	31	25	20	Puente Miraflores
20	0+950	-	6	7.0	30.1	40	39	36	33	31	
21	1+000	-	5	5.5	48.0	40	38	36	33	27	
22	1+050	-	4	7.0	29.2	40	39	38	37	35	Se corrió unos 5 m. por el Puente
23	1+100	-	-	6.0	47.5	40	38	36	32	23	
24	1+150	2L	-	6.5	33.5	40	39	37	36	34	
25	1+200	6L	5	6.0	47.5	40	38	36	34	32	
26	1+250	2L	-	6.0	29.8	40	39	37	35	33	
27	1+300	6M	26	-	5	-	-	-	-	-	
28	1+350	2M	6	7.5	31.8	40	39	37	36	35	
29	1+400	6L	-	-	45.2	40	37	33	27	21	Puente Benavides
30	1+450	4L	8	7.0	37.8	40	39	38	37	35	
31	1+500	4L	6	7.0	49.8	40	39	35	33	31	
32	1+550	4L	5	7.0	35.8	40	37	35	30	27	
33	1+600	2L	15	7.0	50.0	40	39	36	35	29	
34	1+650	4L	10	7.0	36.2	40	38	35	32	28	
35	1+700	-	4	7.0	48.9	40	39	37	36	35	
36	1+750	2L	8	7.5	35.2	40	37	35	32	29	
37	1+800	-	5	10.0	46.4	40	39	38	36	35	2 capas 4cm. capa nueva
38	1+850	-	6	7.3	35.5	40	39	37	35	27	
39	1+900	-	11	7.0	45.3	40	39	36	34	27	
40	1+950	-	-	6.0	32.3	40	39	36	34	32	



PROCESAMIENTO DE DATOS

Proyecto : Evaluación Estructural de la Vía Expresa
 Solicitante : CONALVIAS
 Operador : N.N.V.

Fecha : 23 - 04 - 07
 Equipo : Viga Benkelman / Rel. 4:1 / Lx10²
 Responsable : W.G.L.
 5.3

N	Progresiva	Fisura	Ahue.	C.A. (cm)	T°C	L1	L2	Lf	d0	d25	T°C	D0	D25	Rc (m)
1	0+000	-	-	6.0	47	40	39	28	48	44	41.7	42	39	883
2	0+050	-	-	5.0	47	40	39	35	20	16	41.7	18	14	866
3	0+100	2M	-	9.0	49.4	40	38	8	128	120	44.1	105	99	475
4	0+150	-	-	7.0	31.4	40	37	23	68	56	26.1	65	54	272
5	0+200	2L	-	9.0	46.5	40	39	17	92	88	41.2	77	74	930
6	0+250	2L	5	7.0	31.2	40	39	31	36	32	25.9	35	31	814
7	0+300	-	-	5.0	43.4	40	39	24	64	60	38.1	59	55	852
8	0+350	-	10	5.0	32.8	40	39	32	32	28	27.5	31	27	811
9	0+400	2M	-	7.0	45.6	40	39	27	52	48	40.3	46	42	892
10	0+450	4M	18	4.5	32.0	40	39	31	36	32	26.7	35	31	805
11	0+500	8M	-	5.5	49.6	40	39	24	64	60	44.3	56	53	886
12	0+550	4L	6	4.5	36.2	40	39	35	20	16	30.9	19	15	820
13	0+600	2L	-	6.3	49.6	40	38	21	76	68	44.3	66	59	450
14	0+650	6L	-	7.0	32.1	40	37	24	64	52	26.8	61	50	273
15	0+700	2M	2	7.5	47.0	40	38	24	64	56	41.7	55	48	454
16	0+750	6M	11	6.5	34.5	40	39	30	40	36	29.2	38	34	828
17	0+800	-	3	5.5	34.5	40	39	30	40	36	29.2	38	34	821
18	0+850	-	-	7.0	33.8	40	38	31	36	28	28.5	34	26	414
19	0+900	-	-	5.5	45.7	40	37	20	80	68	40.4	72	61	290
20	0+950	-	6	7.0	30.1	40	39	31	36	32	24.8	35	31	808
21	1+000	-	5	5.5	48.0	40	38	27	52	44	42.7	46	39	439
22	1+050	-	4	7.0	29.2	40	39	35	20	16	23.9	19	16	803
23	1+100	-	-	6.0	47.5	40	38	23	68	60	42.2	60	53	443
24	1+150	2L	-	6.5	33.5	40	39	34	24	20	28.2	23	19	823
25	1+200	6L	5	6.0	47.5	40	38	32	32	24	42.2	28	21	443
26	1+250	2L	-	6.0	29.8	40	39	33	28	24	24.5	27	23	802
27	1+300	6M	2	6.5	29.8	40	39	33	28	24	24.5	27	23	804
28	1+350	2M	6	7.5	31.8	40	39	35	20	16	26.5	19	15	819
29	1+400	6L	-	7.0	45.2	40	37	21	76	64	39.9	67	56	297
30	1+450	4L	8	7.0	37.8	40	39	35	20	16	32.5	18	15	850
31	1+500	4L	6	7.0	49.8	40	39	31	36	32	44.5	31	27	915
32	1+550	4L	5	7.0	35.8	40	37	27	52	40	30.5	48	37	280
33	1+600	2L	15	7.0	50.0	40	39	29	44	40	44.7	38	34	916
34	1+650	4L	10	7.0	36.2	40	38	28	48	40	30.9	45	37	420
35	1+700	-	4	7.0	48.9	40	39	35	20	16	43.6	17	14	910
36	1+750	2L	8	7.5	35.2	40	37	29	44	32	29.9	41	30	280
37	1+800	-	5	10.0	46.4	40	39	35	20	16	41.1	17	13	946
38	1+850	-	6	7.3	35.5	40	39	27	52	48	30.2	48	45	839
39	1+900	-	11	7.0	45.3	40	39	27	52	48	40	46	42	891
40	1+950	-	-	6.0	32.3	40	39	32	32	28	27	31	27	814

Figura 7.3 Recolección y procesamiento de datos

Fuente: El autor.

Los resultados de deflexiones y radios de curvatura permiten determinar sectores de comportamiento estructural homogéneo. La Figura 7.4 muestra el deflectograma resultante de graficar las deflexiones máximas obtenidas en cada estación evaluada. La homogeneidad de la gráfica evaluada a partir de la amplitud alcanzada permite determinar sectores de comportamientos estructurales similar y de esta manera contar con un criterio de sectorizado para el tramo.

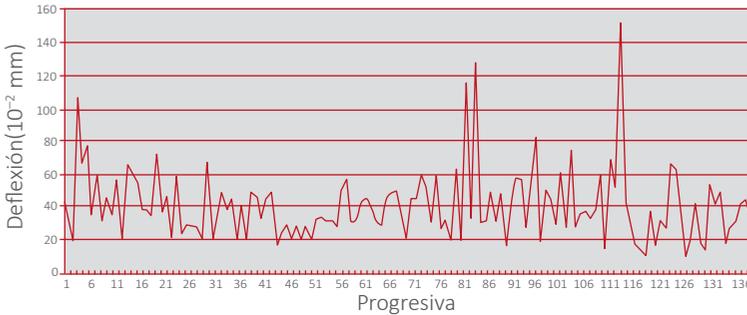


Figura 7.4 Deflectograma para evaluar el estado estructural de la vía

Fuente: El autor.

7.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

7.2.1 MÉTODO EMBÍRICO

Los datos recopilados en la evaluación deflectométrica se procesan estadísticamente considerando la distribución normal de acuerdo a la distribución de Gauss. Luego, se podrá determinar la deflexión media (\bar{D}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (C_v) para “n” determinaciones, mediante las expresiones siguientes:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{(n-1)*}} \quad C_v = \frac{\sigma}{\bar{D}} \times 100$$

(*n para n > 30)

La σ corresponde a la distorsión de resultados que posean el mismo valor medio \bar{D} de deflexión. El valor C_v indica un mayor o menor grado de dispersión, aún para un distinto valor medio. Para realizar el diseño del refuerzo, la deflexión característica representa mejor a una determinada sección mediante la expresión:

$$D_c = \bar{D} + t \cdot \sigma$$

Como muestra la Tabla 7.1, el valor de “t” corresponde a un porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la deflexión característica D_c .

Se aprecia que los valores de “t” en cada probabilidad evaluada, para el diseño de un refuerzo, el espesor deberá ser tal que solo una pequeña área resulte infradiseñada. Luego, “t” es una decisión técnica y económica, que dependerá del número de determinaciones, grado de confiabilidad, relación entre costos de mantenimiento y rehabilitación (M&R), variabilidad de capacidad estructural o constructiva, del tráfico, de la ubicación e importancia de la carretera, entre otras.

Tabla 7.1 Valor de “t” y probabilidad de ocurrencia de $D > D_c$

Valor diseño (%)	$D_c + \bar{D} + t\sigma$	$D > D_c$ %
50	\bar{D}	50
75	$\bar{D} + 0.674 \sigma$	25
85	$\bar{D} + \sigma$	15
90	$\bar{D} + 1.3 \sigma$	10
95	$\bar{D} + 1.645 \sigma$	5
98	$\bar{D} + 2\sigma$	2
99	$\bar{D} + 2.33\sigma$	1
99.9	$\bar{D} + 3\sigma$	0.1

Fuente: El autor.

La División de Carreteras de California considera trabajar con el 80 % de valor de diseño mientras que el Instituto del Asfalto y Canadá recomiendan usar el 98 %, a lo cual le corresponde una D_c igual a $(\bar{D} + 2\sigma)$. El método CONREVIAl adopta un valor de D_c igual a $(\bar{D} + 1.645\sigma)$ que corresponde al 95 % de probabilidad de diseño, superado solo por el 5 % de las determinaciones efectuadas.

Otro valor importante es la deflexión admisible. Esta deflexión corresponde a aquella que alcanzará el pavimento al final del tiempo de diseño. Por lo tanto, esta deflexión se calcula considerando la sollicitación de cargas para ese tiempo de diseño, representado en el valor “N” de ejes equivalentes acumulados hasta el último día de servicio. Luego, la expresión será:

$$N = \frac{1,15}{D^4} \text{ o también, } D_{adm} = \sqrt[4]{\frac{1,15}{N}}$$

Donde:

N: Número de ejes estándares equivalentes de 8,2 toneladas acumuladas en el período de diseño.

D: Deflexión característica admisible (inicial) en mm.

Los valores de N resultan del estudio de tráfico, lo cual integra conteos de vehículos, campaña de pesaje de los vehículos pesados para la determinación del coeficiente de agresividad o factores destructivos y varias tasas de crecimiento anual del mismo.

Los valores calculados de R_c , D_c , y \bar{D} la D_{adm} se contrastan con la Tabla 7.2, que presenta las recomendaciones a tener en cuenta para el diseño del refuerzo y cuando se emplea el método empírico.

Tabla 7.2 Análisis combinado de los resultados de evaluación

Deflectometría	Estado visual	Estado estructura	Recomendación
La deflexión característica es superior a la admisible. Los radios de curvatura son elevados o aceptables (en relación a la estructura). $D_c > D_{adm} + R_c$	No hay fallas de origen estructural.	Estructura infradiseñada, pero la capacidad portante de las capas decrece en profundidad (No existe capa débil inmediatamente debajo de la capa asfáltica).	Examinar fecha y tipo de las últimas obras ejecutadas, para justificar estado del pavimento. 1° CASO
	Hay fallas de origen estructural generalizadas.		Hay acuerdo entre todas las variables a) Las deflexiones son empleadas para el cálculo de refuerzo. b) Para deflexiones muy fuertes, analizar económicamente reconstrucción. Verificar refuerzo con métodos diseño. 2° CASO
La deflexión característica es superior a la admisible. Los radios de curvatura son pequeños (aún para deflexiones reducidas). $D_c > D_a - R_c$	Hay fallas de origen estructural por fatiga (Fisuras tipo piel de cocodrilo).	Existe una capa débil inmediatamente debajo de la capa asfáltica (Relación entre módulos de elasticidad < 1).	Se trata de neutralizar el efecto de la capa que falla, ya sea por reconstrucción parcial, o refuerzo. <u>No es conveniente emplear la deflexión, ya que puede no ser representativa.</u> 3° CASO
La deflexión característica es inferior a la admisible. Los radios de curvatura sea reducidos. $D_c < D_a - R_c$		Existe una capa débil inmediatamente debajo de la capa asfáltica.	Analizar fecha de mediciones y tipo estructura. Neutralizar el efecto de la capa débil (reconstrucción o refuerzo). <u>De ninguna manera se pueden considerar las deflexiones para el proyecto; emplear métodos de diseño.</u> 3° CASO
La deflexión característica es inferior a la admisible $D_c < D_a$	Hay fallas de origen estructural: deformaciones permanentes de la fundación.	Estructura degradada no adecuada para la fundación.	Evaluar aporte estructural de la calzada existente (reconstrucción o refuerzo). <u>La deflexión no es representativa.</u> 4° CASO
	No hay fallas de origen estructural.	Estructura bien diseñada.	Corregir fallas de origen superficial, las soluciones dependerán de los defectos observados y sus causas. Mejora superficial. 5° CASO

Fuente: Método de CONREVIAL.

Para la determinación de los espesores de refuerzo, se utiliza el método de reducción de las deflexiones con varias fórmulas que propone el documento CONREVIAl. Se puede indicar que este método se basa en la reducción de la elongación vertical sobre la subrasante provista por una capa adicional de carpeta asfáltica de espesor “h”. Ella solo es utilizable si esta elongación es representativa del modo de ruptura del pavimento y de su daño, es decir, solamente en el caso de pavimentos flexibles con pocos espesores de carpeta asfáltica que continúan flexibles después del refuerzo. Es el caso de la mayoría de las carreteras en su primera rehabilitación.

Para el cálculo del espesor de refuerzo, en los casos 1.º y 2.º, se empleará la fórmula de Ruiz (Argentina), cuya expresión es:

$$h = \frac{R}{0.434} \log \frac{D_0}{D_h}$$

Donde:

h : Espesor de refuerzo (cm)

D_0 : Deflexión característica antes del refuerzo (1/100 mm)

D_h : Deflexión característica luego del refuerzo o D_{adm} de diseño (1/100 mm)

R : Coeficiente con dimensiones de un espesor

El valor de “R”, mostrado en la Tabla 7.3, expresa la capacidad del material de refuerzo para reducir la deflexión del pavimento subyacente. Depende del material de refuerzo y de la rigidez relativa entre el pavimento existente y el refuerzo. Se sugiere su determinación de manera experimental. Por ejemplo, R es igual a 18 para los espesores de refuerzo del orden de 5 cm y con deflexión característica de 0,70 mm. Faltará aplicar la deflexión admisible y verificar que el espesor de refuerzo (h) sea igual a las 5cm su puesto para R.

Tabla 7.3 Valores recomendados para R

Deflexión características antes del refuerzo (1/100 mm)	Espesor de refuerzo "h" (en cm)			
	5	10	15	20
50	20	21.5	(23)	(24.5)
70	18	19.5	21	22.5
90	17	18.0	19.5	21.0
120	15	16.5	18.0	19.5
150	13.5	15.0	16.5	18.0
170	13.0	14.5	16.0	17.5
200	12.0	13.5	15.0	16.5

Fuente: CONREVIAl.

Para los casos 3.º y 4.º, se emplearán métodos racionales para diseño de pavimentos, como por ejemplo el método AASHTO. La fórmula general ha sido tratada anteriormente, sin embargo la ecuación de diseño de espesores sigue teniendo la expresión siguiente:

$$SN = \sum_{i=1}^n a_i d_i$$

Donde:

SN : Número estructural de diseño

a_i : Coeficiente de transformación de espesor, para la capa i

d_i : Espesor de la capa i

La expresión corresponde a la condición más general y donde los factores de drenaje $m_2=m_3$ son iguales a la unidad, de materiales granulares y drenantes.

7.2.2 MÉTODO ELÁSTICO

La evaluación estructural de la subrasante está basada en el análisis de las curvas de deflexiones medidas, utilizando para ello modelos matemáticos y la teoría de la elasticidad. Se basa en que la deflexión máxima es un indicador de la capacidad de soporte del suelo de fundación. Además, la curvatura que adopta la subrasante, reflejada en su deformada, es un indicador de la calidad y la resistencia de la misma.

La base matemática para la evaluación estructural la constituye el modelo bicapa elasto-lineal conocido como el modelo de Hogg, que es el instrumento teórico usado para la interpretación de las curvas de deflexiones.

La interpretación consiste en comparar las curvas de deflexiones medidas, con las teóricas obtenidas según el modelo de Hogg, para la misma configuración y magnitud de carga utilizada en los ensayos de campo. La comparación se establece mediante el valor de la deflexión máxima y el parámetro asociado a la longitud elástica que emplea la curva deformada.

El análisis de las curvas de deflexiones se efectúa mediante un procedimiento computarizado, utilizando un software que emplea algoritmos matemáticos desarrollados para dar solución numérica a las formulaciones teóricas rigurosas del modelo de Hogg. El software empleado se basa en la versión original del programa de cómputo elaborado por el Transportation Research Institute (Technion, Israel) y presentado en la Cuarta Conferencia Internacional en Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos, realizada en Ann Arbor, Michigan, en 1977; y de los programas REHA.DAT y REHA.PRO, preparados en el año 1985 para el MTC y hecho para una calculadora portátil Sharp-1500²⁸ y luego para un computador personal, con datos de entrada como:

- Carga de ensayos de 4,100 kg
- Presión de inflado (80 psi)
- Espesor total de la subrasante (50 cm, 40 cm, y 30 cm)
- Distancia radial que corresponde a las deflexiones adicionales medidas (R1, R2,... Rn)
- Profundidad del estrato rígido en el modelo de Hogg ($H/L0 = 10$)
- Factor para el cálculo del CBR (110) en función de la calidad del suelo
- Deflexiones máxima y adicionales (D0, DR1, DR2,...DRn)

Los resultados que se obtienen del procesamiento de datos son:

- Radio de curvatura (Rc)
- Módulo de elasticidad de la subrasante (E0)
- Capacidad de soporte de la subrasante (CBR)

El desarrollo completo puede llamarse en las tesis asesoradas por el autor y trabajos de consultoría de la empresa Berger-Lagesa para el MTC.

²⁸ Cfr.: A. García y W. Gutiérrez

7.3 DEFLEXIONES FWD Y VIGA BENKELMAN

Una de las primeras aplicaciones y conclusiones se realizó en la carretera Piura – Paita y Piura – Sullana – Puente Macará. La toma de deflexiones en la totalidad de la carretera, se efectuó con el FWD y se contrastó con medidas en cortas longitudes efectuadas con la Viga Benkelman (VB), que permitieron transformar las deflexiones con el FWD, a deflexiones con VB y continuar el cálculo con el método CONREVIAL.

Es deseable disponer de más valores equivalentes de VB, para analizar datos de la experiencia ya adquirida en Perú con la Viga Benkelman, cuyo documento CONREVIAL presenta la síntesis. Con el proyecto Sistema de Gestión de Carreteras, se hizo correlaciones entre las medidas FWD y Benkelman, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 7.5 y donde se puede apreciar la tendencia de sus valores.

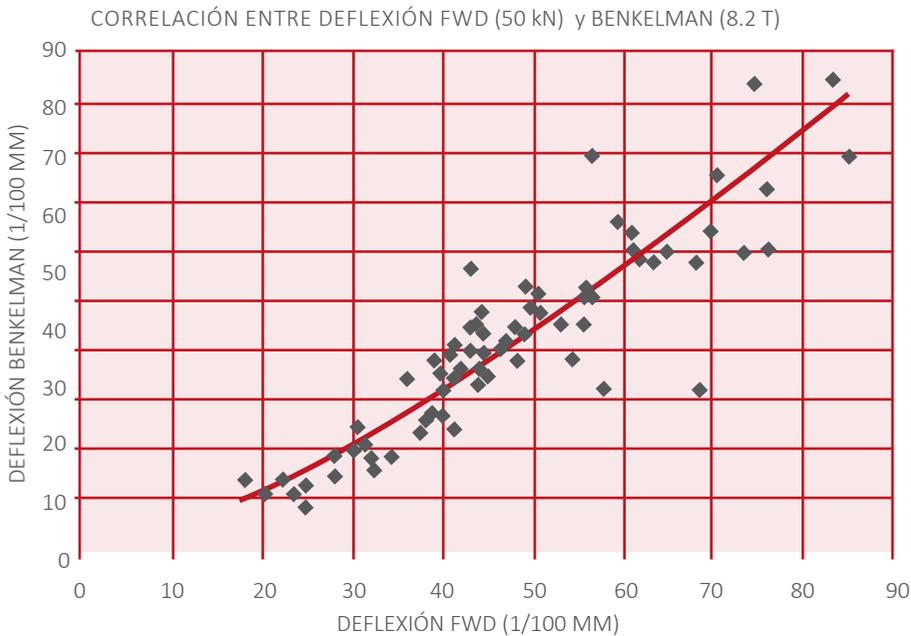


Figura 7.5 Correlación entre ensayos de deflexiones FWD y VB

Fuente: El autor.

El gráfico muestra una correlación entre los dos tipos de ensayos, según la fórmula:

$$\text{Log}_{10}(\text{Def}_{\text{VB}}) = 1.381667121 * \text{Log}_{10}(\text{Def}_{\text{FWD}}) - 0.753588955$$

Donde:

Def_{VB} : Deflexión con Viga Benkelman (8.2 t) ajustada a 20 °C

Def_{FWD} : Deflexión FWD (50 kN) ajustada a 20 °C

La fórmula, utilizada para convertir las deflexiones FWD en deflexiones VB, puede escribirse:

$$\text{Def}_{\text{VB}} = 0.176 * (\text{Def}_{\text{FWD}})^{1.382}$$

Sobre los deflectogramas es posible definir visualmente tramos homogéneos que son zonas que presentan valores de deflexión que pertenecen estadísticamente a la misma población de valores interpretado como comportamiento estructural homogéneo.

7.4 ESTRATEGIAS DE REFUERZO

De acuerdo a las exigencias de los términos de referencia, se podrá diseñar el pavimento para una vida útil de 10 y 20 años por separado y en el mejor de los casos una rehabilitación por etapas, que permita una primera inversión mediante la colocación de refuerzo que conduce a una vida útil y luego prolongar la vida de servicio para 10 años más.

La alternativa se emplea por restricciones económicas o por desconocimiento de una de las variables de diseño, especialmente el tráfico. De esta manera, la rehabilitación pone en uso a la vía y con el servicio que aporte se podrá definir algunas características que quedaron supuestas.

Cuando se aplique el método de CONREVIAL, se podrá utilizar la fórmula de evolución, parecida a una vista anteriormente de las deflexiones después del primer refuerzo:

$$N = \frac{1.90}{D_c^{5.3}}$$

Donde:

N : Número de ejes estándares equivalentes de 8,2 t, para los que se diseñó la alternativa propuesta (en millones)

D_c : Deflexión característica del pavimento al llegar a su condición crítica, al término de la vida útil, en mm

La Tabla 7.4 muestra un ejemplo con tasa de crecimiento igual a 5.0 % para el tráfico. Además, se presentan dos alternativas para 10 y 20 años. En una primera fase se hace solamente el refuerzo para un servicio de 10 años y al término de este plazo se hace otro refuerzo para alcanzar a los 20 años.

Tabla 7.4 Diseño por etapas según deflectometría ($r = 5\%$)

Tramos	1A	1B	2		3	4A		4B	5		
Tránsito acumulado 10A T10 (Millones)	11.70	8.90	3.03		2.51	0.76	0.52		3.70		
Deflexiones características D_{c_1}	0.43	0.66	0.74	0.35	0.53	0.65	0.72	0.60	0.40	0.73	0.38
Corrección estacional de D_{c_1}	0.60	0.92	1.04	0.49	0.74	0.91	1.01	0.84	0.56	1.02	0.53
Deflexiones admisibles Da_1 ($N = 1,15/d^4$)	0.56	0.60	0.78	0.78	0.78	0.82	1.11	1.22	1.22	0.75	0.75
Rehabilitación ($h = 18/0.434 \text{ Log } dc/da$)											
Con corrección	1.31	7.79	5.00	No	No	1.82	No	No	No	5.65	No
Tránsito acumulado 20A T20 (Millones)	30.77	23.57	7.98		6.62	1.99	1.36		9.72		
Tránsito acumulado entre 10 y 20 años (T20-T10)	19.07	14.67	4.95		4.11	1.23	0.84		6.02		
Evolución de D_{c_2} durante los 10 primeros años (T10) $N=1,90/D_{c_2}^{5,3}$	0.71	0.75	0.92			0.95				0.88	
Deflexión admisible para el tránsito (T20-T10) Da_2 ($N=1,15/d^4$)	0.53	0.57	0.74			0.78				0.71	
Rehabilitación después de 10 años de servicio ($h=18/0,434 \text{ Log } dc/da$)	5.27	5.02	3.79			3.59				3.99	

Fuente: El autor.

La Figura 7.6 cruza información de la deflexión característica respecto a la deflexión admisible (D_a) por la apreciación del estado visual según el índice de la condición del pavimento (PCI). Cada uno de los casos mostrados corresponde a los siguientes:

LPCI		$D_c < D_a$	$D_c > D_a$
Bueno		1	2
Regular		3	4
Malo		5	6

Figura 7.6 Integración de valores de D_c , D_a y PCI

Fuente: El autor.

Caso 1: Deflexión característica inferior a la deflexión admisible y excelente valor de PCI. Solo se necesita mantenimiento normal.

Casos 2 y 3: Casos dudosos. Hacer análisis complementarios: historia de la carretera, mantenimiento reciente (por ejemplo, sello que puede esconder degradaciones), proximidad de la deflexión característica respecto a lo admisible (la cual no puede ser solución absoluta), antes de decidir sobre la oportunidad de hacer un refuerzo.

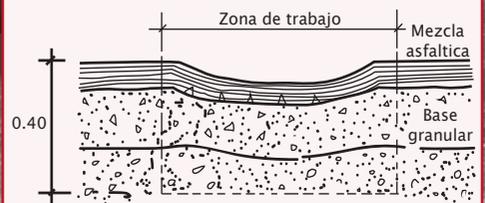
Casos 4, 5 y 6: Hacer rehabilitación y refuerzo. También en el 5 a pesar que tiene buen valor de deflexión.

Capítulo

8

Rehabilitación y mantenimiento

DETALLE F – Para zonas de depresiones y corrugaciones



(a) Determinación y retiro de capas componentes falladas

	K	H
ABET	90	10

Logros:

Plantea las alternativas de solución a los problemas relevados con las metodologías establecidas en el curso. Particulariza las soluciones de acuerdo a la magnitud de los problemas.

TEMARIO:

- › Principales alternativas de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos
- › Mantenimiento superficial y subsuperficial preventivo, rutinario y correctivo

INTRODUCCIÓN

Los resultados de las evaluaciones de campo y laboratorio establecen una forma particular de cómo evaluar las carreteras. Como en toda especialidad, se tiene el aporte del profesional en el proceso de los resultados obtenidos. No es conveniente aceptar el resultado proveniente de los programas de cómputo, sin antes haber tenido la evaluación particularizada de cada caso. Se debe analizar por oposición los resultados propios del procesamiento para determinar una compatibilidad en ellos y permitiendo realizar diferentes enfoques. La discrepancia permite el análisis de coherencia de las causas, efectos y alternativas de solución.

En esta etapa, los trabajos de rehabilitación o mantenimiento se basan en las recomendaciones provenientes de las metodologías comentadas anteriormente. Tanto el método de CONREVIAl como las recomendaciones, según el modelo de Hogg, presentan alternativas basadas en el análisis de datos provenientes de la evaluación superficial y estructural. El método de CONREVIAl se basa en las deflexiones características y admisibles halladas mediante el procesamiento estadístico de los datos recopilados en campo. Por otro lado, también se emplea el valor del radio de curvatura generado por la deformada como respuesta a la sollicitación de carga.

Actualmente, el MTC sugiere el empleo del método CONREVIAl, ya que la inversión efectuada hace muchos años debe tener la sostenibilidad del caso. Los trabajos de CONREVIAl, en el año 1983, se aplicaron en varios kilómetros, en cuyo caso la evaluación deflectométrica permitió realizar los diseños. El modelo matemático de Hogg o método elástico se basa en la interpretación de la combinación entre la máxima deflexión alcanzada por la carga y de la longitud característica de la deformada misma. En el año 1986, se implementó la aplicación del modelo de Hogg para evaluar las deflexiones²⁹, transmitiendo el conocimiento al Laboratorio Central del MTC (hoy OAT), debido a su condición supervisora de los trabajos encargados.

En el año 1990, los trabajos efectuados con el préstamo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) propició la formación de una oficina administradora del préstamo, llamada Unidad Ejecutora de Proyecto (UEP). El asesor de la UEP, por varios años, fue la empresa peruana Barriga Dall'Orto, la misma que formó parte del consorcio CONREVIAl con argentinos y canadienses.

²⁹ Cfr.: Dr. Jacob Greinstein con el Consorcio Berger – Lagesa, tramo de la Panamericana Norte.

Como era de esperarse, los términos de referencia respaldaron las evaluaciones deflectométricas mediante la metodología desarrollada por el consorcio CONREVIAL y no por la que emplea los métodos matemáticos. Estas recomendaciones del MTC perduran hasta los concursos de méritos. En algunos casos, se ha permitido el empleo de métodos alternativos para evaluar estructuralmente al pavimento. Por ejemplo, la evaluación de la carretera Piura – Sullana – Macará se aplicó el deflectógrafo de impacto (FWD), que registra deformaciones dinámicas, las mismas que posteriormente tuvieron que ser transformadas a estáticas para cumplir con las exigencias de los términos de referencia dispuestos por el MTC; siendo las primeras mediciones mejores valores de modelamiento de la estructura.

Los diseños de una estructura de pavimento nueva responden a métodos tradicionales. Para determinar los espesores de cada una de las capas componentes de la estructura, se debe conocer la capacidad de soporte de los suelos de subsiguiente y el tráfico proyectado al tiempo de vida útil o de servicio, hallando el número estructural que luego será transformado en espesores de capas. En realidad, la mayoría de los métodos de diseño, por no decir todos, se sustentan en el valor de soporte del terreno donde descansará la estructura.

La rehabilitación de un pavimento y sus condiciones de diseño varían según el estado situacional del pavimento actual. Una de las formas de afrontar estos problemas corresponde al considerar cuál es el número estructural requerido para que el pavimento tenga una vida remanente añadida coincidente con las exigencias del MTC. Para ello, se debe determinar el número estructural de diseño, como si fuera un pavimento nuevo por construir y luego restar el número estructural existente, el mismo que se obtiene por las evaluaciones comentadas anteriormente.

Esta descripción bien puede corresponder a los diseños recomendados por la AASHTO. Para el caso del método CONREVIAL, el espesor de refuerzo se determina con la fórmula sugerida por el Dr. Ruiz, la cual se basa en las deflexiones, tanto característica como admisible, y del radio de curvatura. El método del SARP se basa en los valores del PCI existente y proyectado según alternativa de solución adoptada, y de las recomendaciones de la AASHTO. Además, sugiere valores más coherentes que permiten manejar las alternativas de solución, según la disponibilidad económica o el nivel de rehabilitación requerido.

8.1 ANÁLISIS DE REHABILITACIÓN

Un sistema de análisis de rehabilitación de pavimento (SARP) genera alternativas de mantenimiento y rehabilitación (M&R)³⁰, simulando la actuación de un ingeniero experto y permitiendo determinar lo siguiente:

- Posibles acciones correctivas que el pavimento pueda requerir.
- La vida remanente estimada (VRE) de la estructura como se encuentra.
- Tiempo añadido por cada acción de M&R.
- Costo por km.
- Beneficio producido en la calidad de rodaje.

La información está asociada a cada tramo de vía evaluada y puede ser usada para la toma de decisiones a nivel del proyecto o para suministrar información al sistema a nivel red para efectuar la gestión de inversión.

8.1.1 PROCESO PARA EVALUACIÓN

El proceso para el análisis de rehabilitación de un pavimento requiere de una secuencia lógica de tratar los datos referentes al tramo analizado. En lo posible se puede determinar un algoritmo programable, que permita, al menos, que los resultados sean mayormente confiables.

El trabajo debe permitir actualizar los costos unitarios de las diferentes estrategias de M&R empleadas, dejando claro el nombre y el código del proyecto o tramo en base a la designación de la red vial nacional que proporciona el MTC. Se debe atender al momento de ejecución indicando la fecha del análisis (mes y año), así como del responsable del procesamiento. Esta etapa se debe basar en los valores de PCI obtenidos en la evaluación de campo. Todo comentario es contribuyente a enriquecer el trabajo. Serán de suma importancia datos como la altura media del tramo sobre el nivel del mar, que permita estimar coeficientes estructurales de mezclas asfálticas en función de la temperatura y de otros materiales de la estructura en base al criterio AASHTO.

³⁰ Cfr.: Jugo Burguera

Todo el análisis y los diseños deben tener un adecuado nivel de confianza, que represente un estimado de la probabilidad y de la estadística de los valores de vida remanente determinados. Se puede escoger entre tres niveles de confianza 50 %, 70 % y 90 %. Los niveles elevados solo deben usarse para vías muy importantes, ya que ellos introducen factores de seguridad altos en las estimaciones. Se considera que una gran parte de la vialidad nacional se puede trabajar adecuadamente con una confiabilidad de 50 %.

Se debe indicar los índices de las evaluaciones superficiales, como los valores del PCI del tramo analizado. Además, se incluyen datos sobre el tráfico, como el valor actual del promedio diario de tráfico (PDT), en ambos sentidos o la referencia del último dato confiable y su tasa de crecimiento. Se debe consignar el número estimado de años que el pavimento tiene en servicio, desde su construcción o última rehabilitación mayor, y además, la seguridad de la superficie del pavimento al resbalamiento (patinaje) desde el punto de vista de fricción. Se indicarán los valores de deducción (VD) de las fallas del pavimento, señalando el número de fallas observadas y el valor de CBR de diseño de la subrasante de la vía.

De la estructura existente, se deberá registrar los espesores promedios de la subbase granular ($\text{CBR} < 60$), de la base granular ($\text{CBR} \geq 60$), la base asfáltica en caliente, la base de mezcla asfáltica en frío o de la capa de concreto asfáltico.

De la composición del tráfico, se debe indicar sobre el porcentaje de camiones o vehículos pesados y de su respectivo factor camión, representado como un número promedio de eje equivalente de 8.2 toneladas, la tasa de crecimiento anual del tráfico en porcentaje, el número de carriles de circulación de la vía y el ancho del carril de circulación.

Con la información procesada y del análisis de sus resultados, se obtienen alternativas o estrategias de mantenimiento o rehabilitación. Estas alternativas se deben asociar a los costos que permiten evaluar la rentabilidad de la inversión.

8.1.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Con la finalidad de organizar y facilitar la recolección de información para un análisis de mantenimiento y rehabilitación, debe utilizarse la planilla mostrada en la Figura 8.1. La calidad y la confiabilidad de la información producida por el programa es enteramente dependiente de la calidad y la precisión de la información que le suministre.

+++++
 PLANILLA DE RECOLECCIÓN DE DATOS <SARP>
 +++++

TRAMO: Km. 1120 - Km. 1140
 CÓDIGO GIP DEL TRAMO: M - ST - 8 FECHA: JUN-06
 OPERADOR: W. GUTIERREZ L
 FECHA DE EVALUACIÓN Y/ O COMENTARIOS: ABRIL-06
 Trabajos realizados para preparar el presupuesto 2007
 ALTURA MEDIA (m) SOBRE NIV. MAR: 1100
 NIVEL DE CONFIANZA (50, 70 o 90%) 50 PCI 64
 PDT ACTUAL (vpd- 2 dir) : 752 AÑOS DE SERVICIO: 22
 ES SEGURA LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO POR FRICCIÓN (s/n): 5

PCI- FALLAS- VALOR DE DEDUCCIÓN (VD)

Nº FALLAS EN EL PAV. n = 8

	V.D.		
1 Grieta piel / cocodrilo	89	CBR DE DISEÑO:	45
2 Exudación de asfalto	11		
3 Grietas de contracción	64	ESPESOR PAVIMENTO	cm.
4 Elevac / hundimientos		Subbase	
5 Corrugaciones		Base granular	35
6 Depresiones		Base asf. en cal.	
7 Grietas de borde	16	Base asf. en frío	
8 Grieta reflex. junta		Rodamiento con asf.	5
10 Grietas long / transv.	68		
11 Baches / zanjas rep.	14	Vida estimada del pav. orig. (años)	20
12 Agregado pulido	18		
13 Huecos		% Camiones	50.2
15 Ahuellamiento		Factor camión	8.7
16 Deform. por empuje		% Crecimiento Traf.	3.0
17 Grietas deslizam.		Número de canales	2
18 Hinchamiento		Ancho de canal	3.6
19 Disgreg / desinteg.	18		

Figura 8.1 Planilla de recolección de datos

8.1.3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El análisis de la información permite determinar una serie de indicadores que estiman las condiciones del pavimento, tanto funcional como estructural; además de su posible causa de falla y otras que diagnostican el problema y definen posibles soluciones. Luego del procesamiento de datos y análisis de resultados, se reporta información referida a la Vida Remanente Estimada (VRE). Se indica la vida estimada en años para que el pavimento llegue a su condición de falla funcional de no aplicarse antes alguna acción de mantenimiento mayor. Este valor de VRE corresponde al dato que puede ser empleado en un programa de gerencia de inversión en pavimentos (GIP), para determinar el nivel de prioridad del tramo. Para cada alternativa se presenta la información siguiente:

- Acción o estrategia de M&R.
- Vida total estimada del pavimento en años, una vez que se ejecute la acción indicada.
- Vida remanente agregada por la acción de M&R, VRE (+).
- Costo estimado para la acción en miles de soles /km.
- Índice de condición del pavimento después de que la acción es ejecutada, PCI (d).

Esta información es requerida por el programa GIP³¹ para aplicaciones a nivel red. Las alternativas de M&R pueden ser simples o de doble estrategia. La Figura 8.2 muestra una salida típica del programa SARP, que incluye comentarios referentes al análisis hecho por el programa como área estimada de bacheo requerido por el pavimento.

Además, se indica la probable causa de falla estructural, la calidad en la construcción, la severidad del ambiente, o combinada. La causa estimada en base a los tipos de falla que el pavimento presente y su asociación con los modos de falla indicados. Finalmente, se puede obtener un reporte sobre la duración de algunas acciones de M&R.

³¹ Programa desarrollado por el Dr. Jugo Burguera

SISTEMA DE ANÁLISIS DE REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS

**** S A R P – G.I.P - Versión 1.0 ****

TRAMO: Km 1108 – km 1117
TRAMO CÓDIGO: M-ST-6

FECHA: 9-92
OPERADOR: W. GUTIERREZ L.

***** DATOS DEL TRAMO *****

FECHA RECOLECCIÓN DE DATOS y/o COMENTARIOS: 8-92
ALT. SNM (mts.) = 1100 AÑOS EN SERVICIO = 22
PCI = 52 VIDA EST. PAV. ORIGINAL = 20
50.20001

PDT (vpd) = 752
% CAMIONES =

COND. SUPERF.: Segura
CANALES = 2 / 3.6 M. NIVEL DE CONFIANZA (%) = 50 %
CRECIMIENTO = 3

FACTOR CAM. = 8.7

<PCI>	Pt . FALLA	VALOR DE DEDUCCIÓN
	1 Grieta piel / cocodrilo	90
	3 Grietas contracción	74
	10 Grietas long. / transv.	12
	11 Baches / zanjas rep.	74
	19 Disgreg. / desinteg.	7

<ESTRUCTURA PAVIMENTO> = 35	<Cm.>	CBR de diseño
Superficie concreto asfáltico	5.5	
Base granular	30.0	

***** ANÁLISIS DE RESULTADOS *****

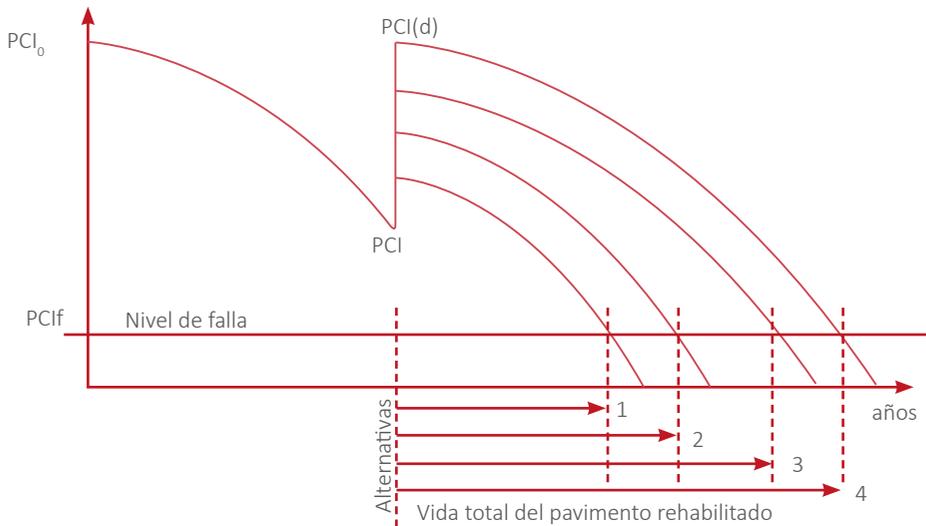
N° ALTERNATIVA DE M&R	VIDA EST. (años)		COSTO	PCI (d)
	TOTAL	VRE (+)	/ Km	
--> VIDA REMANENTE ESTIMADA	2.2			
1 Bacheo de áreas críticas	3.5	1.3	72	74
2 Bacheo extenso	4.4.	2.2	115	81
3 Sello con agregado	4.4.	2.2	57	81
4 Lechada asfáltica	4.4.	2.2	86	81
5 Bacheo de áreas críticas (+) Sello con agregado	6.8	4.5	130	99
6 Bacheo de áreas críticas (+) Capa refuerzo CA e= 7cm.	30.0 Pt	27.8	465	99
7 Rec. Sup. + adit. / asf./ agreg	6.2	4.0	144	99
8 Rec. Sup. + 3 cm. mezcla asf.	20	15.0*	270	99
9 No hacer nada	2.2	0.0	0	52

<COMENTARIOS>

Área estimada de Bacheo % = 30.0
Posible causa de falla : COMBINADA, NO SE DETECTA CAUSA PREDOMINANTE
* Máxima vida remanente agregada por esta alternativa
Pt Debido a que el daño ambiental y otros factores no son considerados 30 años es la max. vida asumida para el pavimento rehabilitado.

Figura 8.2 Salida típica del programa SARP

La Figura 8.3 muestra las actividades por realizar como alternativas de M&R para gestionar adecuadamente las inversiones. Se aprecia las nuevas curvas de degradación que pudieran generarse luego de las actividades de M&R. Se interpreta un mayor tiempo de servicio por actividad realizada.



N° ALTERNATIVA DE M&R	VIDA EST.(años) TOTAL	COSTO VRE (+)	PCI(d) /Km	
VIDA REMANANTE ESTIMADA	2.2			
1. Bacheo de áreas críticas	3.5	1.3	72	74
2. Bacheo externo	4.4	2.2	115	81
3. Sello con agregado	4.4	2.2	57	81
4. Lechada asfáltica	4.4	2.2	85	81
5. Bacheo de áreas críticas (+) Sello con agregado	6.8	4.5	130	99
6. Bacheo de áreas críticas (+) Capa refuerzo CA e = 7 cm.	30.0 Pt	27.8	465	99
7. Rec Sup + adit/asf/agreg	6.2	4.0	144	99
8. Rec Sup + 3 cm. mezcla asf.	2.0	15.0*	270	99
9. No hacer nada	2.2	0.0	0	52

Figura 8.3 Alternativas de M&R

La política de mantenimiento debe estar definida para permitir que las carreteras alcancen el tiempo de diseño. Si bien existe un manual foráneo de mantenimiento, la logística no siempre contribuye para tal fin. A pesar de que los estudios plantean un proceso de degradación para evaluar la rentabilidad del proyecto, estos no son rescatados para establecer la estrategia de mantenimiento. Tal es el caso del empleo del software HDM4, que evalúa más la rentabilidad de la inversión que el análisis de las alternativas mismas.

La gestión en geotecnia vial (G²V) y otros de gerencia de inversión en pavimentos GIP³² evalúan un sistema con información de diferentes tramos en que se divide la red vial nacional. El trabajo consistirá en determinar lo siguiente:

- Niveles de prioridad que las vías presenten.
- Acciones de M&R para cada tramo.
- Presupuesto *tope* (monto de los recursos requeridos para mejorar todas las vías que así lo ameriten).
- Presupuesto *óptimo* en función de los recursos reales disponibles.

Los tramos se ordenan en forma secuencial y según su nivel de prioridad. La Tabla 8.1 presenta la descripción de estos niveles de prioridad que se han basado en la condición del pavimento, en la vida remanente estimada y en la importancia de la vía en función del volumen de tráfico.

Tabla 8.1 Niveles de prioridad para M&R

Prioridad	Condición
1	El pavimento requiere ser mejorado, debe ejecutarse alguna acción de mantenimiento mayor (condición CRÍTICA).
2	El pavimento muestra deterioro, pero su condición es aún "aceptable" y acciones de mantenimiento mayor, aunque recomendables, pueden diferirse.
3	Pavimento en "buena" condición, no se requiere acción especial solo mantenimiento menor localizado.

³² Cfr.: Jugo Burguera

En el nivel de prioridad 2 el pavimento estaría cercano al punto “óptimo de rehabilitación”, en el que las acciones de M&R son realmente efectivas y considerablemente más económicas a largo plazo. De no aplicarse el mantenimiento mayor se requiere mantenimiento rutinario preventivo o correctivo. Se define como mantenimiento mayor a una acción que se aplica a toda la superficie del pavimento en el tramo.

8.2 COMENTARIOS DEL MODELAMIENTO GEOTÉCNICO

El modelo debe proponer un trabajo ordenado y sistemático que permita obtener los parámetros de diseño de pavimentos flexibles, atendiendo a la realidad nacional y a las características de cada región del país.

La geotecnia en vías de transportes (GEO-PAV) presenta factores directos y de uso tradicional, como tráfico, los valores estadísticos Z_r y S_o , el valor de PSI tanto al inicio como al final esperado y el valor de CBR.

El cálculo del tráfico presenta variables que generan mucha incertidumbre. El tiempo real o de servicio a proyectar debe comprender el tiempo necesario para el desarrollo del proyecto y la obra misma.

El nivel de confianza (Z_r) empleado y sugerido para los diseños será el correspondiente al 95 % y para el cual se tendrá un valor de nivel de confianza igual a -1.645. El error que puede ocurrir por efecto de contemplar un tráfico (S_o) de baja probabilidad de ocurrencia admite un valor de probabilidad igual a 0.35 a 0.45.

El índice de serviciabilidad (PSI) es recomendado por el solicitante MTC en sus términos de referencia. Un valor tendrá al momento de culminada la obra (P_o) y otro para luego del tiempo de servicio y de diseño (P_t). La diferencia participará en la fórmula AASHTO.

El módulo resiliente (M_r), determinado luego de sectorizar la vía según la homogeneidad estructural, presenta características coherentes para lograr el diseño. El sectorizado mediante el Método de la Línea 70 ordena el criterio de los profesionales en determinar un valor de diseño coherente con los trabajos futuros. En vías extensas y alejadas de centros poblados, el uso del PDC permite un tamaño de muestra que puede ser procesado estadísticamente.

A nivel mundial se han determinado correlaciones entre el valor de CBR y del Mr, considerando más acorde aquella expresión planteada por el Instituto de Aeronáutica de Brasil, que tiene la expresión siguiente y que es válida para CBR entre 4 a 48, en la cual el Mr está dado en MPa.

$$CBR = 0.0624(Mr)^{1.176}$$

Los factores de influencia son parámetros indirectos que no han participado tradicionalmente en los diseños de pavimentos, como la altitud, el PCI, el SN existente y la adherencia o fricción entre el neumático y la superficie asfáltica.

La altitud está relacionada con las regiones naturales del país, propiciando información sobre la temperatura máxima y mínima, como también de las precipitaciones máximas alcanzadas. Las vías de penetración presentan gran heterogeneidad de los factores mencionados y para lo cual se deberá atender diseños puntuales en cada sector de una misma carretera.

El método del PCI considera evaluar la totalidad del área superficial de la carretera en estudio permitiendo el procesamiento computarizado de las fallas y definiendo actividades de mantenimiento y rehabilitación.

El número estructural existente (SNe) aporta un valor significativo en los refuerzos de diseño y por lo tanto, deberá ser calculado exhaustivamente.

Es poco lo tratado sobre la fricción entre el neumático y la superficie asfáltica, sin embargo las velocidades alcanzadas en carretera no tienen las mismas consecuencias que en otros países. La mayor parte de los accidentes se deben a otros factores.

Los trabajos de sectorizado proporcionan al ingeniero herramientas sólidas para la toma de decisiones, evitando diseños o proyectos vulnerables.

Es muy conveniente visualizar todos los resultados en un plano clave, que permita diferenciar objetivamente los sectores de trabajo.

El método de diseño AASHTO se mantiene vigente, pero con ciertas modificaciones que se orientan como factores de influencia y que actualmente se determina a manera de responsabilidad profesional debido a la falta de normatividad.

La versión de AASHTO 2000 se aplica con ciertas restricciones, lo que sugiere su aplicación contrastando la realidad.

Los trabajos por realizar son afrontados desde un punto de vista filosófico, ya que si no se logra comprender las condiciones de realidad nacional, poco pueden importar los métodos mecanicista, empírico y empírico – mecanicista.

No se debe ahondar en nuevos métodos foráneos si no se establecen las líneas de investigación que permitan normar la forma de diseñar en nuestra realidad. Todo método existente es un buen punto de partida, pero deberá particularizarse al entorno del proyecto.

Los espesores de la estructura recomendada requieren de un claro conocimiento de las calidades de materiales a emplear en la obra. Sin embargo, no se dedica el tiempo adecuado para estas investigaciones quedando su determinación exclusivamente a aspectos teóricos.

Cuando la incertidumbre en los valores determinados no permite hallar el diseño ingenieril definitivo, es conveniente realizarse por partes. De esa manera, no se pierde una elevada inversión en la obra y durante el tiempo de servicio se podrá ejecutar labores correctivas en la determinación de los parámetros de diseño.

8.3 ACTIVIDADES A DESARROLLAR

Los trabajos de investigación deben orientarse a ensayos indirectos que evalúen la capacidad de soporte del terreno de subrasante y que permita mayores y mejores datos obtenidos en el menor tiempo posible.

Al poner en práctica la secuencia del modelamiento propuesto y el sectorizado, es conveniente afinar los requerimientos que sean necesarios en su adaptación a la realidad geográfica nacional.

Adicionalmente, se debe evaluar qué efectos producen los factores de influencia en la estructura de pavimentos, en los materiales constituyentes o en la carpeta asfáltica, que es la más sensible al intemperismo.

El trabajo ordenado y sistemático debe permitir establecer normas de diseño para cada una de las regiones del país mediante la integración de conocimiento de los profesionales que residen en cada región.

Intensificando los trabajos de evaluación del tráfico, se reduce la incertidumbre existente en la actualidad y que redundará muchas veces en una estructura infradiseñada.

Durante los trabajos de campo, se investiga los suelos para la determinación del correcto valor de la capacidad de soporte con fines de diseño y para lo cual se podrá emplear el método de la Línea 70.

Es necesario desarrollar y emplear equipos alternos de recolección de datos de resistencia de la subrasante, del tipo innovador y creativo, que permita incrementar el tamaño de muestra y, de esa manera, reducir la dispersión de los valores de capacidad de soporte.

Conviene complementar la formación con aspectos geográficos de tal manera se logre sensibilizar con las características ambientales de las regiones del país y establecer criterios de diseño para tales situaciones.

Capítulo

9

Aspectos medioambientales

ABET	K	H
	90	10

Logros:

Identificar y priorizar los problemas ambientales relacionados con la estabilidad de taludes y la erosión, para de esta manera determinar las medidas de mitigación correspondiente. Sensibilizar al lector en aspectos sobre las condiciones de suelos, altitud, temperatura, precipitaciones, entre otras variables, propicia diseños por estratos, es decir por grupo de factores incidentes en una zona, sean o no tradicionales.

TEMARIO:

- › *Realidad nacional*
- › *Medio físico*
- › *Articulación de actividades*

INTRODUCCIÓN

Los trabajos en carretera de penetración están condicionados a la realización de los estudios de impacto ambiental. Esto a raíz del préstamo efectuado por el Banco Mundial como requisito a todos los estudios. En el año 93, se realizó cuatro Estudios de Impacto Ambiental (EIA)³³, como modelo de los trabajos que vendrían después y a los cuales se les exigiría este capítulo adicional para que sea incluido en los trabajos integrales. Esta etapa ha generado una nueva especialidad que alberga a profesionales multidisciplinarios. Inicialmente, estos trabajos se realizaron con un grupo de consultores formados por un geotecnista, un forestal y un socioeconomista. Esto nos indica que los trabajos de realizar un EIA no pueden recaer en un solo profesional o que haya un especialista en EIA sin haber definido claramente su afiliación.

Los trabajos deben estar orientados específicamente a identificar y priorizar los problemas ambientales relacionados con la estabilidad de taludes y la erosión para, de esta manera, determinar las medidas de mitigación correspondiente.³⁴

El tema se estructura con la finalidad de integrar aspectos complementarios al diseño de las carreteras, que permita al profesional la toma de decisiones bajo un lineamiento social. Los diseños de carreteras se basan en métodos foráneos, que se han empleado en todas las vías de la red vial nacional; situación debido a que no se cuenta con una norma peruana de diseño. Ahora, para las carreteras transversales en el país, ya no se debe seguir empleando dichos métodos tradicionales. Por el contrario, se deben innovar metodologías de acuerdo a la demanda de diseños coherentes a la realidad de cada zona que atraviesa la vía.

Cuando las carreteras presentan una orientación de oeste a este, y viceversa, las condiciones de suelos, altitud, temperatura, precipitaciones, entre otras variables, propicia diseños por estratos, es decir, por grupo de factores incidentes en una zona, sean o no tradicionales.

³³ Cfr.: W. Gutiérrez, A. Chávez, J. Ríos; EIA para el BM, 1993

³⁴ Cfr.: Libro de Evaluación Ambiental del BM

Bajo esta premisa, se debe atender los factores de influencia que afectan a los diseños de las estructuras de pavimentos y que son causales de la degradación prematura. Entiéndase, factores de influencia social como los parámetros de diseño que generan un proyecto rentable económicamente, y que sin embargo no se ha tomado en cuenta la rentabilidad social. Esto conlleva a pensar que los profesionales deben atender aspectos como la “rentabilidad social de carreteras de penetración”, especialmente a la Amazonía, como innovación de nuevos temas de actualización de conocimientos que beneficie a la mayoría.

9.1 DISCUSIÓN

Las evaluaciones de la rentabilidad de los proyectos de construcción de carreteras de penetración se realizan mediante los alcances que brinda el Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP). Este sistema de evaluación de la inversión en proyectos de caminos rurales o de bajo volumen de tránsito considera un diagnóstico de la situación actual del proyecto a formular y de sus indicadores que justifiquen la inversión. Luego de los diseños de ingeniería, se evalúa el proyecto, realizando el análisis de costo y beneficio, y sus impactos en la sostenibilidad de la obra.

Si bien el SNIP considera aspectos de producción agropecuaria, la evaluación se centra en los aspectos económicos, postergando aspectos sociales de interés nacional. El fundamento radica en la variedad geomorfológica del territorio, como para generalizar los análisis de rentabilidad. La Figura 9.1 presenta vistas fotográficas de tres lugares del país, donde se aprecia diferencias sustanciales en sus geomorfologías. Las carreteras de penetración están afectadas a dichas condiciones heterogéneas y, por lo tanto, se debe reconsiderar el diseñarlas mediante métodos tradicionales.

Los trabajos de investigación deben considerar diseños de pavimentos, que empleen parámetros coherentes con la realidad de las zonas que atraviesa la carretera. Estos parámetros corresponden a los actores sociales, que deben integrarse en la evaluación de los proyectos de inversión y que permita mejorar los análisis de rentabilidad de la inversión en carreteras de penetración hacia la Amazonía.



Desierto de Sechura



Manu



Valle sagrado de los incas

Foto 9.1 Geomorfología diferenciada del territorio peruano

9.2 REALIDAD NACIONAL

La red vial nacional se ha desarrollado en base a la construcción de pavimentos flexibles y no de pavimentos rígidos debido a su elevado costo inicial. Las diferencias entre estos tipos de estructuras se muestran en la Figura 9.2, en la cual se aprecia que cada estructura está compuesta de distintas capas. En el círculo, se aprecia la estructura que actualmente se emplea con ciertas variantes y las bondades de un pavimento rígido actualmente postergado.

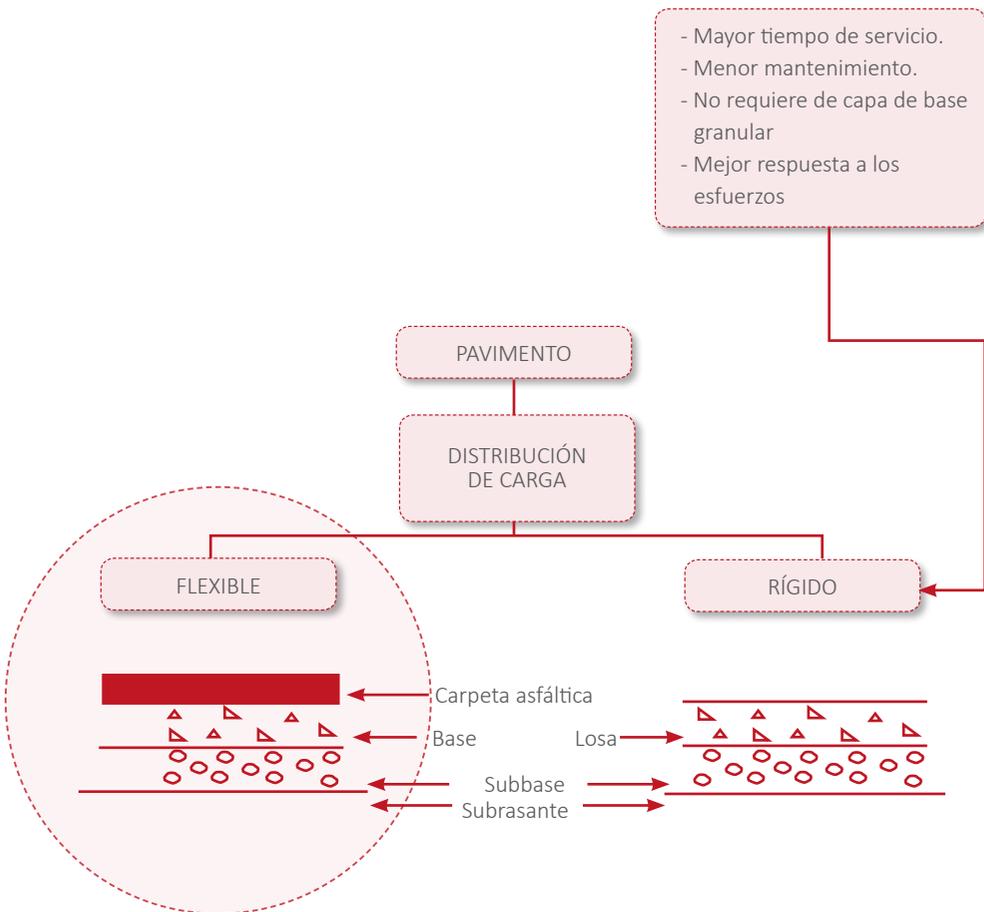


Figura 9.1 Tipos de pavimentos y su composición estructural

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) ha valorado más al pavimento flexible por su relativo bajo costo inicial, permitiendo construir mayor longitud de carretera sustentando la integración de más centros poblados. Además, ha valorado el costo por kilómetro de carretera construida, en las diferentes regiones del país, donde el costo aumenta según la variabilidad topográfica, especialmente cuando se ingresa hacia la Amazonía.

Los análisis de los proyectos de inversión de diseños de carreteras de penetración a la Amazonía deben ser evaluadas mediante factores técnicos tradicionales, técnicos de influencia y por los actores sociales participantes en el área de influencia.

9.3 MEDIO FÍSICO

Los suelos de subrasante, donde descansan las estructuras de pavimentos, varían de acuerdo a la zona que atraviesa el trazo de la carretera. Existen suelos finos como arcillas, limos y suelos gruesos formados por arenas y gravas; en todos los casos se admiten la combinación entre ellos.

En zonas de la costa predominan los suelos gruesos y en las vías de penetración los materiales más finos. En la mayoría de los casos, las zonas de altiplanicie, selva alta y selva baja presentan suelos finos, parcialmente saturados o saturados, con baja capacidad de soporte y susceptibles a la deformación. Se clasifican como materiales débiles, los ubicados en las zonas de Amazonía, con presencia de niveles freáticos cercanos a la superficie, que dificultan la construcción debido a la sobresaturación de los suelos y a los bajos rendimientos alcanzados en la conformación del pavimento.

En las carreteras de penetración, que se orientan transversalmente al territorio (de oeste a este), se presentan factores de influencia o variables independientes, como por ejemplo la temperatura, la precipitación, la gradiente de temperatura, tipos de suelos, materiales de canteras y otras, que no son tomados en cuenta para el diseño del pavimento y por supuesto tampoco para evaluar la rentabilidad de la carretera y que ocasionan su degradación prematura. La red vial crece de manera transversal al territorio y las condiciones de diseños varían en cada sector obtenido de cortes efectuados a la carretera que interactúan con los factores de influencia.

Las carreteras de penetración experimentan diferentes altitudes, iniciando en la costa, con topografía plana y carreteras construidas sobre rellenos. Luego, la carretera inicia el ascenso por una topografía accidentada a media ladera, por las faldas de los cerros. Cuando la carretera alcanza altura considerable con topografía plana, se ubica en la altiplanicie, donde experimenta temperaturas de variación severa en un periodo de 24 horas, con precipitaciones cuyas aguas superficiales y de infiltración no logran drenar debido a los suelos finos. Después, se inicia el descenso hacia la selva alta en donde las precipitaciones son intensas y poco espaciadas, que además de la vegetación abundante a los lados, no se logra el drenaje; y finalmente la zona de selva baja con suelos saturados por las constantes lluvias alternadas con el calor intenso.

En las carreteras de la altiplanicie o selva, los materiales finos saturados originan grandes deformaciones en el suelo, perdiendo la inversión inicial. Las secciones están asociadas a las carreteras existentes donde se puede apreciar la variación de altitud y por ende los factores de influencia, que no son los mismos a lo largo del recorrido, a pesar de que es la misma carretera.

En presencia de suelos finos, las variaciones en la capacidad de carga generan cambios sustanciales en los espesores de las estructuras de pavimento. A menor soporte del suelo, mayor es el paquete estructural del pavimento y viceversa. Se deduce que la estructura del pavimento requerida es mucho mayor y transmite mayor carga al terreno blando, generando otro problema debido a las deformaciones del suelo. Este problema repercute en el hundimiento de la estructura, requiriendo de trabajos correctivos.

El problema se acrecienta al cuestionar la rentabilidad de la carretera. La vía se degrada prematuramente. No considera las disponibilidades de recursos de la zona y no considera aspectos sociales, que puedan justificar la inversión.

La rentabilidad de las inversiones que realiza el Estado en carreteras considera aspectos económicos, sin embargo existen otros actores que no se toman en cuenta para la evaluación. La realidad de las obras de carretera de penetración presenta diferentes variables para la evaluación técnica, mas no las características ambientales y geomorfológicas que presenta el área de influencia.

Los diseños deben efectuarse de acuerdo a las realidades de cada tramo diferente, que presente el recorrido de la carretera, considerando la altitud, el tipo de suelo, la temperatura, el gradiente de temperatura, precipitaciones, materiales disponibles para la conformación del pavimento, volumen y composición de tráfico, entre otros, haciéndose más económicos de lo que se puede pensar y que sea reportado en un análisis de la inversión.

Los diseños no son únicos para toda la longitud de una carretera, ni la rentabilidad puede asociarse exclusivamente a los aspectos económicos. Los trabajos de construcción, o rehabilitación o mantenimiento de carreteras deben estar asociados al impacto social que puede producir o en todo caso una evaluación integrada que permita la toma de decisiones a los directivos responsables de las inversiones.

La Figura 9.3 presenta un modelo de capas de información que propone incluir actores como los medios físicos, los medios bióticos, medios económicos, medios sociales, medios culturales, entre otros y que evaluados puedan establecer una mejora en el análisis de la rentabilidad social, logrando una expresión matemática que represente la mejor alternativa de inversión para la toma de decisiones.

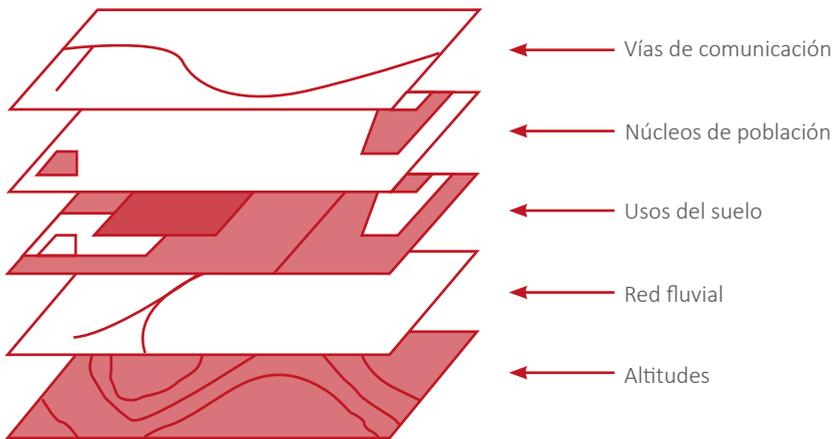


Figura 9.2 Capas de información

Los diferentes actores se integran para el análisis correspondiente, mediante las comparaciones dos a dos que permitan evaluar si las dinámicas que generan las mismas se superponen, son adyacentes o distantes, más aún si entre ellas generan sinergias o conflictos (análisis mediante la matriz FODA geoespacial).

Las interacciones entre estas variables permitirán determinar el grado de importancia que define un vector de análisis a trabajar en la parte de rentabilidad. Estos trabajos se apoyan en imágenes satelitales, fotos aéreas y mapas, en donde se puedan independizar espacios territoriales de interés que pueden ser “digitalizados”, o mejor representado por pequeñas áreas con cierta valoración (modelos de celdas representativas).

La Figura 9.4 permite visualizar que cada una de las capas de información podrá tener valores en subáreas, que integradas a manera vertical (análisis mediante SIG³⁵ raster y vectores de análisis)³⁶, podrá pertenecer a una misma evaluación de interés en la mejora de la rentabilidad.

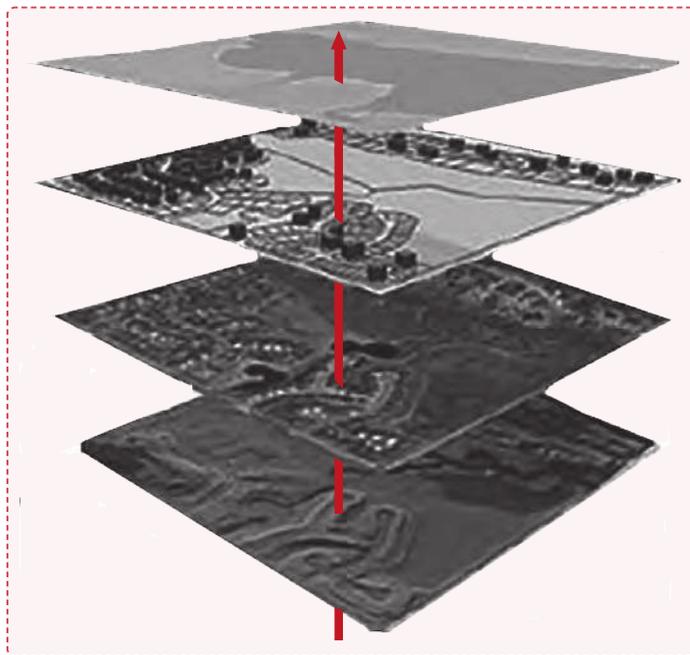


Figura 9.3 Capas y vector de análisis

³⁵ Sistema de Información Geográfica

³⁶ Una imagen rasterizada es una estructura o fichero de datos que representa una rejilla rectangular de píxeles o puntos de color, denominada raster, que se puede visualizar en un monitor de ordenador, papel u otro dispositivo de representación.

Finalmente, se debe entender que existen factores que no se toman en cuenta en los diseños de carreteras para evaluar la rentabilidad, a nivel de evaluación de la inversión pública. En la mayoría de los casos, las evaluaciones ambientales son parte del expediente técnico, y no como elemento de toma de decisiones para evaluar la inversión.

9.4 ESTRATEGIA METODOLÓGICA

Integra nuevos actores o factores de influencia en las evaluaciones de proyectos de inversión, que pudieran ser impactados negativamente durante o después de la obra.

Incluye alternativas de diseños no tradicionales de estructuras de pavimentos, acorde con las realidades de donde se desarrollan los proyectos.

Sensibiliza a los profesionales de la ingeniería, sobre las variables sociales que justifiquen la inversión y la rentabilidad de construir una carretera acorde a la realidad de la zona.

Se recomienda estos análisis a los aspectos geopolíticos, que permitan extender la frontera viva, motivando el desarrollo de las comunidades alejadas y haciéndolas sostenibles en zonas limítrofes.

9.4.1 ALCANCE GENERAL

Desarrolla un modelo matemático de análisis de la rentabilidad social, para los proyectos de inversión en carreteras de penetración hacia la Amazonía, empleando la innovación tecnológica del análisis geoespacial y del planeamiento territorial, logrando así la participación de factores de influencia no tradicionales.

9.4.2 PROPUESTA DE ENTREGABLES

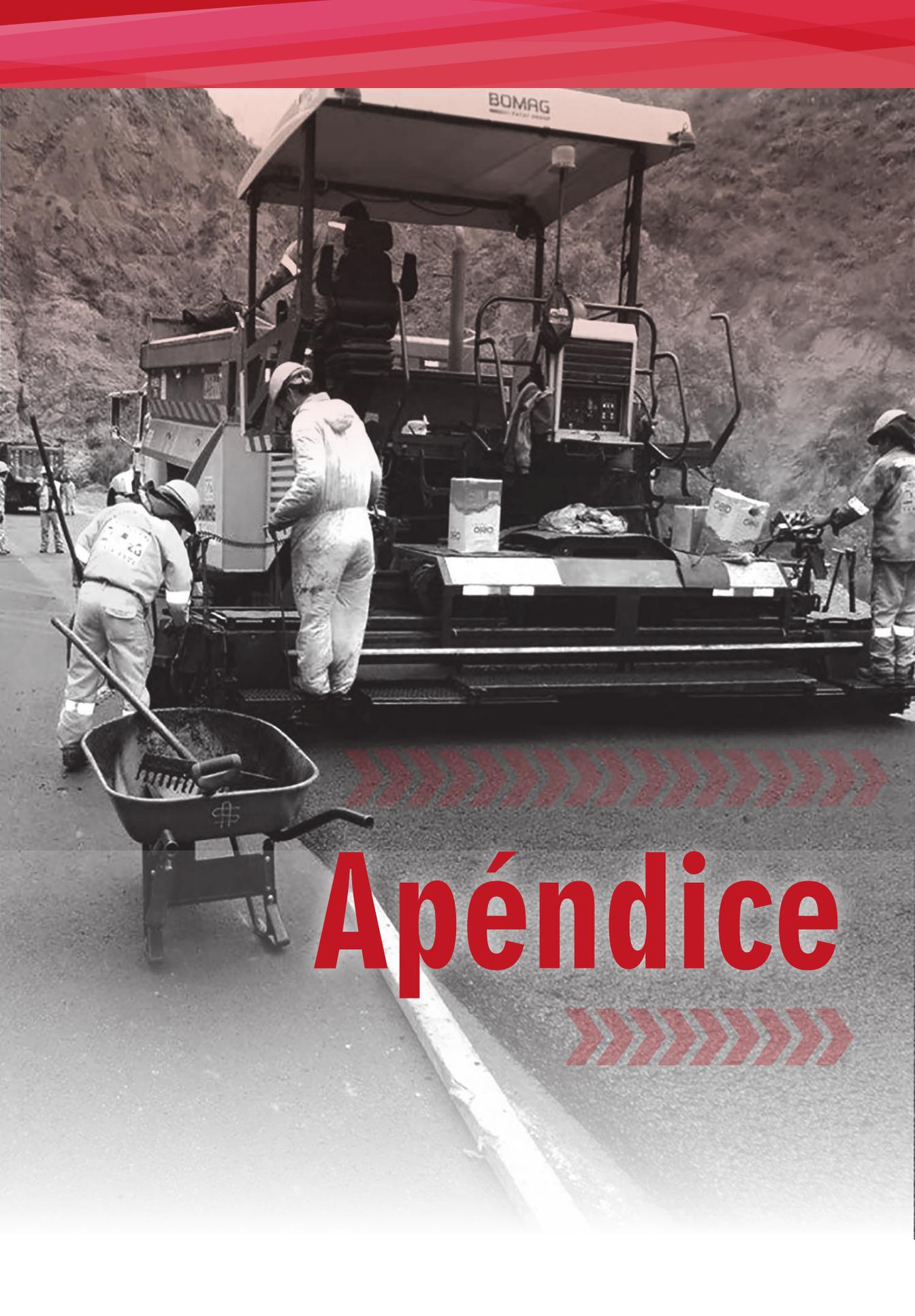
- Generar planos temáticos del territorio nacional que permita la correspondiente sectorización.
- Determinar la muestra de carreteras a nivel nacional que será evaluada en cada investigación.
- Determinar las áreas de influencia para cada una de las carreteras elegidas para la investigación.

- Definir los actores participantes en dicha área de influencia.
- Generar fichas de recolección de datos que permita documentar valores de diseño y factores de influencia, mediante un protocolo adecuado.
- Evaluar cada uno de los actores y establecer una ecuación matemática que refleje su comportamiento con la realidad.
- Desarrollar una matriz de factores para evaluar su mutua interacción.
- Definir los factores de influencia predominante en el área de influencia.
- Asociar los factores a una fórmula matemática que integre a los factores de influencia de una manera coherente e informativa para la toma de decisiones.
- Evaluar y determinar la rentabilidad de dichas carreteras mediante los métodos tradicionales empleados en el medio.
- Integrar el resultado de la evaluación de la rentabilidad económica a los factores de influencia.
- Establecer una metodología integradora de todos los actores en la inversión de una carretera de penetración, que proporcione un índice posible de clasificar y tipificar la vía, así como establecer la rentabilidad de la misma.
- Establecer el diagrama de flujo del proceso de análisis.

9.4.3 ARTICULACIÓN DE ACTIVIDADES

Las actividades a desarrollar de acuerdo a los objetivos establecidos corresponden a las siguientes:

- Recopilar toda información existente en las oficinas a fines con las carreteras elegidas, sobre evaluaciones anteriores ejecutadas en la carretera (etapa heurística).
- Analizar la información recopilada, justificando su utilidad y confiabilidad para nuevas etapas de investigación (etapa hermenéutica).
- Procesar la información analizada, haciendo uso de las herramientas de la estadística, que permita establecer modelos y teorías de seguridad (proceso).
- Proponer, basado en el proceso de la información, un modelo de deterioro de la estructura, aplicando referencias de expresiones básicas de degradación en función de los factores no tradicionales (hipótesis).
- Contrastar la hipótesis mediante la observación en el tramo de prueba, que permita el reajuste de la expresión de degradación propuesta (comprobación).



BOMAG

Apéndice

PROBLEMAS PROPUESTOS

1. Mencione las diferencias más relevantes que existe entre un pavimento flexible y uno rígido.
2. ¿Por qué considera importante el estudio de la mecánica de suelos aplicada a las vías de transportes?
3. Indique tres diferencias entre el modelamiento geotécnico de una edificación y un pavimento flexible.
4. Bosqueje la red de aprendizaje del curso.
5. Bosqueje el concepto de vida remanente, indicando todas sus partes.
6. Mencione tres causas y efectos de falla de un pavimento. Realice un breve comentario.
7. Una carretera con 12 años de servicio presentó el estudio de tráfico mostrado. Determine el tráfico proyectado para 5, 10, 15 y 20 años.

Detalle	LIG	OMB	C2	C3	ST y T
IMDi	855	574	1253	202	77
FDi	4.7	2.83	4.15	1.99	4.6
TASA (r)	3.5	3.9	4.1	5.2	3.7

8. Halle gráficamente el CBR al 85 % percentil, así como el Mr (en PSI) si los datos son:

CBR	8	22	13	10	12	17	24	14	9	20	22	129
Frecuencia	25	12	71	39	24	32	8	29	28	34	22	10

9. ¿Cuál es el mayor valor del grado de compactación que puede determinarse en un suelo cohesivo y friccionante? Demuéstrelo gráficamente.

10. Se presenta el tráfico con una tasa de crecimiento anual de 5.5 % y se quiere diseñar un pavimento para un vida de servicio de 10 años. Luego se verifica que el tráfico se debió proyectar con una tasa de 2.8 %, a lo cual los ejes acumulados eran tres veces el ya estimado. ¿Qué exceso o defecto (en valor absoluto) experimenta la vida útil de servicio?

Detalle	Omn	C-2	C-3	ST y T
IMD	24	39	51	10
Fd	2.58	2.58	6.79	12.77

11. ¿La expresión “...el pavimento rígido puede ser más barato que el pavimento asfáltico...” es cierto o falso? Justifique su respuesta.

12. Mencione dos causas de falla de una estructura de pavimento debido al trabajo durante el proyecto.

13. Dada la tabla de valores de CBR, halle gráficamente el CBR de diseño al 85 % percentil.

15	26	18	22	8	22	13	10	12	17	24	14	9	20	22	29	19	14	12	12	13	15	17	19	23
17	17	28	13	25	12	71	39	24	32	8	29	28	34	22	10	26	26	19	22	23	24	24	24	23
16	16	16	15	19	22	21	24	16	24	24	20	19	19	23	23	22	22	22	22	20	12	19	20	19
11	11	11	24	24	25	19	18	17	19	12	12	12	16	16	16	23	23	23	18	18	17	16	13	14

14. El estudio de tráfico de la carretera Huayre-Chicrín, realizado en el año 2007, arrojó valores de 359, 250, 120, y 100 para los tipos de vehículos ómnibus, camión de 2 ejes, camión de 3 ejes y semitráiler, respectivamente. Atendiendo a la composición del tráfico, en el orden dado, se determinó que los valores de los factores destructivos aumentan al doble que el anterior tipo de vehículo donde los ómnibus alcanzaron 1.67. Por otro lado, se comprobó que las tasas de crecimiento para los ómnibus son igual a 8.3 y las demás decrecían a la mitad que el anterior. ¿Cuál es el primer año de servicio y calcule el tráfico de diseño para 15 años de servicio?

15. La degradación de un pavimento flexible responde a la expresión $(-0.097t^2 + 5)$. Si luego de los trabajos de rehabilitación el pavimento se degrada según $(-0.042t^2 + 6.5)$, calcule cuántos años vida remanente añadida alcanzará si se busca que el pavimento a lo largo de su servicio ofrezca una serviciabilidad final promedio de 1.5.
16. En un pavimento que ya tiene 8 años de servicio, y cuyo estudio de tráfico realizado se resume en el cuadro mostrado se realizarán trabajos de rehabilitación que durarán un año. Se requiere que la estructura rehabilitada sirva por 15 años más. Determine el tráfico proyectado para el diseño.

Estudio de tráfico	OMB	C2	C3	ST y T
IMDi	221	102	98	47
FDi	3.1	3.9	4.3	5.2
Tasa (r)	4.5	3.9	2.0	2.8

Además, halle el número estructural de diseño (SNdis) con el tráfico del (P3) para un Zr de 95 % (correspondiente a -1.645), So igual a 0.45 y una serviciabilidad inicial de 4.5 y final de 1.5. Además de la exploración de campo, se determinó que el CBR es igual a 11.00.

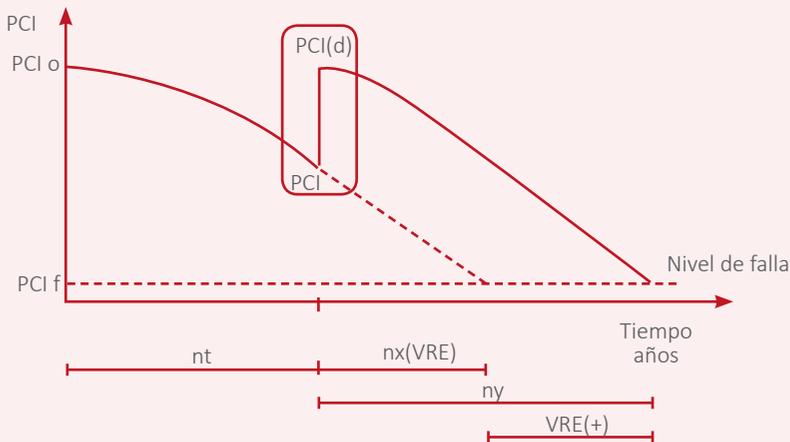
17. Calcule la suma de los resultados del cálculo de los ejes equivalentes acumulados para el análisis de 5, 10, 15 y 20 años de la carretera Cañete-Chupaca si el año de la evaluación del tráfico fue hecho en el 2005 y la elaboración del estudio en el año 2013. Considere como años de trámites igual a 2.0.

Detalle	Ómnibus	C2	C3	STT
IMDi	241	521	203	95
FDi	2.32	3.89	5.23	7.50
TASAS (r)	5.50	4.20	3.50	2.90

18. Diseñe un pavimento para 10 y 20 años de servicio de una carretera cuyo estudio del tráfico mostrado fue evaluado en el 2003. Calcule la suma de los cuadrados de los resultados de los ejes equivalentes ya calculados.

Detalles	Ómnibus	C2	C3	STT
IMDi	158	631	187	103
FDi	3.32	4.89	6.23	7.80
Tasa (r)	6.50	5.20	2.50	4.90

19. Del gráfico de “concepto de vida remanente” realice un comentario al sector marcado por el recuadro.



20. ¿Qué ventaja presenta el empleo del método de Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos en los diseños de los pavimentos asfálticos? Sustente su respuesta.

21. Halle el número estructural de diseño si el CBR_{sr} es 11 %, 0.45 el error estándar del tráfico proyectado para una probabilidad del 95 % ($t = -1.645$) de certeza del diseño, un nivel de falla por serviciabilidad igual a 1.5 de la estructura diseñada al 90 % de la excelencia y con $N = 3.5 \times 10^6$.

22. Halle el tráfico proyectado a 10 años de servicio para una tasa de 5.0 %. Datos al 2003.

Detalle	Omn	C-2	C-3	ST y T
IMD	137	66	88	9
Fd	2.3	4.2	7.3	11.7

23. ¿Cuál es el número estructural de un pavimento compuesto de 30 cm subbase con 25 % de CBR y 20 cm de base con 60 % de CBR? La carpeta con fallas tipo “piel de cocodrilo” tiene un espesor de un quinto de la capa de subbase.
24. La degradación de un pavimento está dada por la ecuación $PSI = -0.05t^2 + 5.05$. Al 9.º año se rehabilita generando a partir de este año una degradación igual a $PSI = -0.045t^2 + 8.5$, ¿cuál será la vida remanente añadida considerando que el nivel de falla sea igual a la unidad?
25. Dada la medida de las deflexiones igual a 104.54×10^{-2} mm y su desviación estándar 52.46×10^{-2} mm, ¿cuál será la deflexión tolerable para una vida útil de 10 años y CBR de subrasante igual a 23 % si el refuerzo es de 4” según el método de CONREVIAL?
26. ¿Cuál es la importancia de realizar un perfil estratigráfico en la etapa de estudio?
27. ¿Por qué razón el valor de soporte de diseño para estructuras de pavimentos, se ha modificado al M_r en vez del tradicional CBR?
- a. Más fácil b. Tipo de carga c. Tipo de suelo
d. CBR obsoleto e. N.A.
28. ¿Qué tipo de impacto genera la contaminación del polvo de la planta de asfalto?

29. ¿Cuáles de los siguientes, son métodos de evaluación superficial de pavimentos?

1. PASER, HOGG, PCI
2. CONREVIAl, HOGG, Dr. RUIZ
3. PCI, CONREVIAl, Dr. RUIZ
4. MTC, PASER, CONREVIAl

- a. Solo 1 b. Solo 2 y 3 c. Solo 4
d. Solo 1 y 3 e. N.A.

30. De la ecuación mostrada se puede deducir lo siguiente:

$$PCI = 100 - \left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{mi} VD(T_i, S_j, D_{ij}) \right] * F$$

1. Es empleado solo en pavimentos flexibles con fallas en su superficie.
2. El valor F es un coeficiente de minoración del valor de deducción.
3. La expresión no requiere de la severidad de las fisuras.

- a. FFV b. VFV c. FVF
d. VVF e. N.A.

31. Determine las afirmaciones correctas. ¿Qué se entiende por deflexión admisible?

1. Es la deflexión que permite absorber las cargas de los camiones en el tiempo transcurrido para el servicio.
2. Es la deflexión alcanzada al cabo del tiempo de servicio sin discriminar las cargas de diseño.
3. Es la deflexión empleada en el diseño de la estructura del pavimento.

- a. Solo 1 y 2 b. Solo 1 y 3 c. Solo 2
d. Solo 1 e. N.A.

32. La expresión “a mayor número de fallas, menor PCI”, ¿es correcta?

1. Solo si existen más de 5 fallas.
2. Solo si los valores de deducción son menores a 5.
3. Siempre es verdadero.
4. Siempre es falso.

- a. Solo 1 y 2 b. Solo 4 c. Solo 3
d. Solo 2 e. N.A.

33. Indique cuáles son las etapas de una planificación vial.

34. ¿Cuáles son las partes del análisis para el modelamiento de estructura de pavimento que cruza el territorio nacional?

35. Mencione al menos cuatro medios que participan como factores de influencia en los diseños de carreteras transversales al territorio nacional.

36. ¿Qué se entiende como diseño por estrato y qué actores participan?

37. Determine la deflexión característica al 95 % de probabilidad que se obtiene a partir de las deflexiones que se presentan en la tabla. Las mediciones corresponden al método CONREVIAL realizado en la carretera Panamericana Norte en el tramo km 54 + 000 – km 58 + 000, efectuado con la Viga Benkelman con relación de brazos <4 : 1>.

Considere que $[D_c = D_{prom} + 1.645 \sigma]$

Punto	km	Fisura	Espesor C.A. (cm)	Lecturas (0.001 MM)		Temperatura C.A. (°C)
				L1	L2	
1	54.000	8E	14.0	15.0	9.0	26.5
2	54.200	8E	13.0	17.0	10.5	25.9
3	54.400	6E	13.0	20.0	14.0	26.5
4	54.600	8S	10.0	22.0	19.0	26.3

5	54.800	6M	13.0	13.0	7.0	28.3
6	55.000	6M	12.0	12.0	2.0	27.4
7	55.200	8M	12.0	13.5	9.5	27.4
8	55.400	6M	12.0	12.0	11.0	27.3
9	55.600	6M	11.5	10.5	7.5	27.8
10	55.800	8M	12.0	15.5	3.0	27.6
11	56.000	8S	13.0	13.5	8.5	27.6
12	56.200	8S	10.0	19.0	10.0	28.6
13	56.400	8M	11.0	18.0	9.5	27.6
14	56.600	8M	10.0	15.0	9.0	28.8
15	56.800	8M	11.0	16.0	12.5	28.9
16	57.000	8S	10.0	16.0	9.0	28.9
17	57.200	8M	10.0	11.5	8.5	29.4
18	57.400	8M	10.0	13.0	11.5	29.0
19	57.600	6M	11.0	13.0	8.5	29.2
20	57.800	6M	11.0	20.0	10.5	28.5

38. Se diseñan dos pavimentos (flexible PF y rígido PR) con datos, insumos y parámetros de diseño iguales. Para este caso se deduce lo siguiente:

1. El PR requiere igual mantenimiento que el PF.
2. Los PR siempre serán más caros que los PF.
3. Los PF requieren de la etapa de laboratorio más no el PR.
4. Los PR durarán más que los PF.

- a. FFFF b. VVFFV c. VVVV
 d. FFVF e. N.A.

39. Mencione cuatro impactos ambientales directos positivos determinados en la construcción de una carretera.

40. Mencione al menos cuatro impactos indirectos negativos determinados por la construcción de una carretera.
41. ¿Qué factores exógenos se deben evaluar en los diseños de carreteras de penetración al interior del país?
42. Determine el espesor del pavimento con carpeta igual a 5.0 cm y capas granulares iguales, que se extraen de canteras con CBR igual a 80 % y 60 %. Considere un tráfico de diseño igual a 11, 957,510 ejes; $Z_r = 95\%$; $S_o = 0.45$; serviciabilidad inicial y final iguales a 4 y 2 respectivamente. La subrasante presenta un CBR igual a 30.
- a. 35 cm b. 45 cm c. 55 cm
d. 65 cm e. N.A.
43. Determine si los siguientes enunciados son verdadero o falso:
1. Todo diseño de carretera requiere de la etapa de laboratorio.
 2. CONREVIAl solo evalúa estructuralmente al pavimento.
 3. La Universidad de Wisconsin propone otra evaluación estructural hasta rango 10.
 4. El modelo de HOGG es el método empírico que evalúa las deflexiones.
- a. VFVV b. VFVF c. VFFF
d. VVFF e. N.A.
44. Halle el índice de la condición de un pavimento que presenta los datos siguientes:

Falla	10	12	19	11
Densidad %	8.16	10	0.07	2.05
Severidad	H	L	M	M

- a. 54 b. 49 c. 37
d. 38 e. N.A.

45. Halle el percentil al 90 % de probabilidad de los resultados de CBR obtenidos al 95 % de la máxima densidad seca dada por el proctor.

N.º	CBR										
1	20	9	46	17	26	25	20	33	48	41	32
2	39	10	26	18	46	26	51	34	26	42	39
3	32	11	51	19	51	27	32	35	46	43	46
4	26	12	20	20	46	28	51	36	20	44	46
5	46	13	51	21	51	29	48	37	46	45	20
6	51	14	48	22	26	30	26	39	51	46	46
7	48	15	51	23	52	31	42	38	46	47	20
8	32	16	46	24	52	32	39	40	32	48	46

- a. 20
- b. 27
- c. 48
- d. 32
- e. N.A.

46. ¿En qué porcentaje varía el SN al diseñar con el CBR y con el módulo resiliente?

- a. 20
- b. 30
- c. 45
- d. 80
- e. N.A.

47. Mencione cuatro métodos de evaluación superficial de pavimentos

48. ¿Qué características debe tener un sistema de evaluación superficial

49. Escriba la ecuación del PCI usada en el método de evaluación superficial

50. ¿Qué ventajas tienen el método del PCI frente otros métodos?

51. ¿Cuál es valor del PCI conocido como “punto óptimo de rehabilitación”?

52. Mencione cuatro maneras de sectorizar una carretera con fines de diseño

53. ¿Qué se entiende por radio de curvatura y cómo se determina?
54. ¿Qué expresión se emplea para la corrección por temperatura de las deflexiones halladas con la Viga Benkelman?
55. ¿Qué se entiende por deflexión admisible?
56. ¿Qué parámetros se evalúan para dar un pronunciamiento sobre la estructura del pavimento en los métodos de CONREVIAl y modelo de Hogg?
57. ¿En el método de CONREVIAl, para calcular el refuerzo, siempre se emplean la evaluación deflectométrica?
58. ¿En qué caso utilizaría el asfalto PEN 60-70 o el PEN 85-100?
59. ¿Qué se busca con el estudio de canteras y fuentes de agua?
60. ¿De qué depende la aceptación o no de una cantera?
61. ¿Qué acciones tomaría si la única cantera con la que cuenta para la obra no cumple con las especificaciones técnicas para su uso?
62. ¿Cómo se asocia el SARP con el GIP?
63. Una muestra de arcilla saturada de forma cilíndrica de 10 cm de diámetro y 2.5 cm de espesor se ha comprimido hasta tener 2 cm de espesor sin cambiar su diámetro. Su relación de vacío inicial es 1.35 y su gravedad específica es 2.67. Halle:
- El peso específico de masa saturado inicial.
 - La relación de vacíos después de la compresión.
 - El peso específico de masa saturada y el cambio de humedad causado por la compresión.
- Suponga que toda la compresión se ha producido por la reducción de la relación de vacíos y la correspondiente pérdida de agua.

64. Determine si los siguientes enunciados son verdadero o falso:

- a. Cuando se compacta una masa de suelo aumenta su peso unitario y su gravedad específica.
- b. La gravedad específica de una arena proveniente de una cancha de relaves es alta y podría estar entre 2.00 y 2.20.
- c. En un suelo fino arcilloso su resistencia al esfuerzo cortante depende principalmente de su ángulo de fricción interna.
- d. El contenido de humedad de un suelo siempre es 100 % cuando está saturado.

65. Se tiene los siguientes ensayos efectuados en las muestras M-1, M-2 y M-3:

SUELO		M-1	M-2	M-3
Malla	Abertura (mm)	(%) Acumulado que pasa		
2"	50.3			100
1 1/2"	38.1			94
3/4"	19.05			90
1/2"	12.7			88
3/8"	9.53	100		85
1/4"	6.35	98		80
N°4	4.76	96		77
N°10	2	83		64
N°20	0.84	72		45
N°30	0.59	65		32
N°40	0.43	60	100	28
N°60	0.25	58	90	19
N°100	0.15	55	87	12
N°200	0.07	50	75	5
Límite líquido (%)	65	65	57	25
Límite plástico (%)	38	38	30.1	20

- Clasifique por el sistema SUCS e indique simbología y el nombre.
- Clasifique por el sistema AASHTO e indique el grupo y el índice de grupo.

66. Con respecto a los límites de consistencia de un suelo fino, defina el concepto de “estado plástico” y conteste en forma breve y precisa: ¿Cómo se comporta el suelo en este estado? ¿Cómo define el rango del estado plástico? ¿Cómo se comporta el suelo si pierde humedad y sale del estado plástico?
67. Se ha realizado un Ensayo Próctor modificado método “A” en un material de subrasante de una carretera. Los datos de laboratorio son los siguientes:

Detalle	1	2	3	4
Peso molde +suelo compactado húmedo (gr)	3936	4089	4222	4130
Humedad (%)	4.7	6.8	9.3	11.9
Peso molde (gr)	2240	2240	2240	2240
Volumen molde (cm ³)	944	944	944	944

Las especificaciones indican un mínimo de 95 % de grado de compactación para dicha capa. Para controlar la compactación, se tomaron las siguientes pruebas de densidades *in situ*:

Punto	Densidad húmeda (gr/cm ³)	Humedad (%)
1	1.96	10
2	1.945	8
3	1.95	8.5
4	1.908	9

Determine la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad y el grado de compactación de los puntos de control. ¿Son aceptables los resultados? ¿Es conveniente continuar con la obra y colocar la capa de base?

68. Responda de forma objetiva y precisa las siguientes preguntas:
- Indique en un esquema las estructuras de un pavimento flexible y un pavimento rígido, indicando sus componentes.
 - Compare la distribución de cargas entre un pavimento flexible y rígido. Comentarios sobre duración y costos.
 - ¿Cuáles son los tipos de carreteras de mayor presencia en la red vial del Perú, en dónde se ubican y cómo es su estructura?
 - Mencione cuatro problemas geotécnicos que se pueden presentar en diversas regiones del país para la construcción de las carreteras. Mencione ejemplos.
 - ¿Cuál es el ensayo de esfuerzo cortante del suelo aplicado a pavimentos? ¿Qué propiedades geotécnicas del suelo influyen en el valor a obtenerse?
 - ¿Qué es la serviciabilidad de un pavimento?
 - ¿Cuáles son las causas por las que se deteriora un pavimento flexible?
 - Indique para cuántos años se diseña un pavimento flexible y cuándo se deben hacer los trabajos de rehabilitación.
69. De acuerdo al paradigma sobre la filosofía de diseño, mencione tres analogías entre los componentes de diseño de un pavimento y un edificio.
70. Grafique el concepto de “vida remanente y rehabilitación” e indique la pérdida de servicio.

Bibliografía

AASHTO (1993). *AASHTO guide for Design of Pavement Structures*. Washington D.C.: AASHTO.

Assarson, B., Granholm, P. & Karl, G (2001). *Libro de consulta para evaluación ambiental*. Estados Unidos: Banco Mundial.

Banco Mundial (2001). *Libro de consulta para evaluación ambiental T1y T2*. Estados Unidos: Banco Mundial.

Banco Mundial (2000). *Manual ambiental para el diseño y construcción de vías*. Perú: Banco Mundial.

Beltrán, A., Cueva, H. (2004). *Ejercicios de evaluación privada de proyectos*. 3.^a ed. Perú: CIUP.

Beltrán, A., Cueva, H. (2003). *Evaluación privada de proyectos*. 2.^a ed. Lima, Perú: CIUP.

Brack Egg, A., Mendiola Vargas, C. (2010). *Ecología del Perú*. 3.^a ed. Perú: Bruño.

Cardelús, B., Guijarro, T. (2009). *Capac Ñan [El Gran Camino Inca]*. Perú: Aguilar.

CIP - Consejo Nacional (1998). *Informe del fenómeno del niño 1997-1998*. Perú: CIP.

CONREVIAl (1983). *Estudio de rehabilitación de varreteras en el país*. Capítulo VI: Aspectos de Evaluación de Pavimentos, Volumen C. Perú: MTC.

Huang, Y. H. (2000). *Pavement analysis and design*. University of Kentucky: Prentice-Hall.

Jugo Burguera, A. (2001). *Gerencia de inversión de pavimentos*, Manual del Usuario. Venezuela: MTC.

Kolstad, Ch. (2001). *Economía Ambiental*. 2.^a ed. Reino Unido y otros: Oxford.

MEF (2005). *SNIP Normas del sistema nacional de inversión pública PT-25*. 2.^a ed. Perú: ICG.

MTC (2000). *Itinerario de rutas*. Perú: MTC.

Oñate, J.J. y otros. (2002). *Evaluación ambiental estratégica - La evaluación ambiental de políticas, planes y programas*. España: Mundi Prensa.

Pulgar Vidal J. (1996). *Geografía del Perú - Las ocho regiones naturales*. Perú: Peisa.

Reátegui Lozano, R., Tovar Torres, M. (2004). *Fundamentos y modelos de educación ambiental*. Perú: Servicios Gráficos J.J.

Shahin, M.Y., Khon, S.D. (1987). *Método de evaluación de pavimentos (PCI)-Reporte técnico M-268*. Caracas: USACE.

Impreso en los talleres gráficos de



Surquillo

