UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

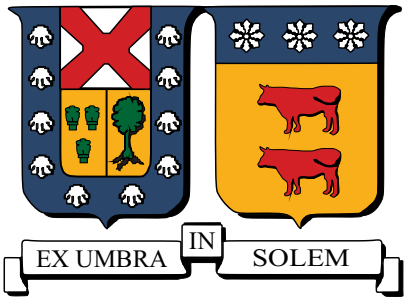
2019

INDICADORES DE DESEMPEÑO PARA CAPACIDAD ESTRUCTURAL Y VIBRACIONES DEL PAVIMENTO Y SERVICIABILIDAD DE PARADEROS, PARA MODELO DE NIVELES DE SERVICIO EN CARRETERAS CONCESIONADAS

BURGOS DIEDRICHS, SEBASTIÁN ALEJANDRO

https://hdl.handle.net/11673/47059

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA



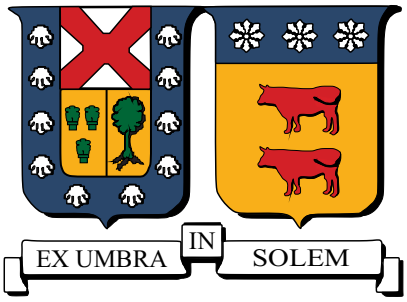
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

INDICADORES DE DESEMPEÑO PARA CAPACIDAD ESTRUCTURAL Y VIBRACIONES DEL PAVIMENTO Y SERVICIABILIDAD DE PARADEROS, PARA MODELO DE NIVELES DE SERVICIO EN CARRETERAS CONCESIONADAS.

SEBASTIÁN ALEJANDRO BURGOS DIEDRICHS

Ingeniero Civil

Agosto de 2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

INDICADORES DE DESEMPEÑO PARA CAPACIDAD ESTRUCTURAL Y VIBRACIONES DEL PAVIMENTO Y SERVICIABILIDAD DE PARADEROS, PARA MODELO DE NIVELES DE SERVICIO EN CARRETERAS CONCESIONADAS.

Memoria de Título presentada por
SEBASTIÁN ALEJANDRO BURGOS DIEDRICHS

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Carlos Manuel Wahr Daniel

Agosto de 2019

TÍTULO DE LA TESIS

INDICADORES DE DESEMPEÑO PARA CAPACIDAD ESTRUCTURAL Y VIBRACIONES DEL PAVIMENTO Y SERVICIABILIDAD DE PARADEROS, PARA MODELO DE NIVELES DE SERVICIO EN CARRETERAS CONCESIONADAS.

AUTOR

SEBASTIÁN ALEJANDRO BURGOS DIEDRICHS

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Ing. Carlos Wahr Daniel _____

PhD Rodrigo Delgadillo Sturla _____

Ing. Rodrigo Canedo Rojas _____

Valparaíso, Chile, Agosto de 2019.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo desarrollado en esta memoria pone fin a un largo proceso de aprendizaje que por ahora cierra un ciclo y da el impulso para continuar con él fuera de las aulas, este camino se recorrió acompañado por innumerables personas que en su debido momento aportaron con el desarrollo de quien ahora termina esta carrera, a cada uno de ellos va dirigido este mensaje de agradecimiento por entregar su tiempo, apoyo, conocimientos y cariño.

Un especial agradecimiento a mi familia, base desde la cuál ha sido posible llegar al lugar en el que ahora me encuentro. A mis padres, Astrid y Francisco, pilares fundamentales de apoyo, fortaleza, contención y acompañamiento incondicional durante toda esta maratónica carrera, todo sus esfuerzos y sacrificios dieron frutos, es ahora tarea personal, seguir labrando la tierra con el mismo amor y dedicación que uds han inculcado con el ejemplo.

Agradezco de los amigos que encontré y formé a lo largo de la universidad, unidos al mismo propósito de cumplir esta meta, compartimos mas que un aula, compartimos valiosos momentos de penas y glorias, compartimos con nuestras familias, compartimos pasiones deportivas, hobbies, vacaciones, viajes y tantas otras experiencias que dejaron huellas imborrables.

A los integrantes de este proyecto de mi casa de estudios UTFSM, profesores y compañeros de universidad, que con su dedicación y disposición, en conjunto con quienes agradecí previamente llevaron a buen puerto, ¡al fin!, todo este esfuerzo.

RESUMEN

Esta memoria se enmarca en el proyecto FONDEF de Investigación Tecnológica IT16I10008 titulado “Modelo para evaluar los niveles de servicio de carreteras en Chile, implementable en bases de licitación para nuevas concesiones” a cargo de las instituciones Universidad Técnica Federico Santa María y Universidad de Concepción, con la participación de la Coordinación General de Concesiones de Obras Públicas.

Los temas estudiados corresponden a diversos activos viales en el desarrollo del modelo para evaluar el nivel de servicio, para los que se analiza el estado del arte y la práctica nacional e internacional, se evalúa su incorporación al modelo, se definen parámetros e indicadores que permitan cuantificar el estado de dichos activos asociándolos a umbrales de desempeño para ser incorporados a la evaluación global de la carretera que permita definir un estándar de servicio. Se realiza también una búsqueda de nuevas tecnologías y procedimientos de auscultación, que no representen un incremento relevante en los costos de la infraestructura vial concesionada.

Cada capítulo presente en esta memoria corresponde a uno de los activos viales estudiados, en primer lugar, se considera la Capacidad Estructural del pavimento, seguido de las instalaciones de Paraderos, finalizando con el fenómeno de Vibraciones, cuya fuente corresponde al tránsito vehicular de la carretera.

Para los primeros dos temas, se concluyó con el desarrollo de un sistema de evaluación del desempeño a través de escalas categóricas, la capacidad estructural de los pavimentos se definirá a través del parámetro deflexión, para pavimentos flexibles el indicador será la deformación máxima en el centro del punto de aplicación de la carga, mientras que para pavimentos rígidos, el indicador consiste en la eficiencia de la transferencia de carga. En cuanto a los paraderos, éstos serán evaluados según la funcionalidad y/o integridad según una serie de elementos definidos a cumplir.

El aporte a las actuales Bases de Licitación consiste en la incorporación de los activos “Capacidad Estructural” y “Paraderos” a un modelo por niveles de servicio, evaluados por medio de calificaciones categóricas, presentando también las especificaciones del equipo, normativa, metodología y umbrales de evaluación.

Para el tema de “Vibraciones” del pavimento generadas por el tránsito, se desestimó su incorporación al modelo de evaluación. Sin embargo, se sugiere incorporar estudios de vibraciones en etapas de anteproyecto y mapas de vibración en la concesión.

ABSTRACT

This study is demarcated in the project FONDEF of technological investigation IT16I10008 entitled "Modelo para evaluar los niveles de servicio de carreteras en Chile, implementable en bases de licitación para nuevas concesiones" in charge of Universidad Técnica Federico Santa María and Universidad de Concepción in collaboration of the Coordinación General de Concesiones de Obras Públicas.

The topics analyzed in this study are a variety of road infrastructure assets used to develop the model that will evaluate the level of service. For this purpose the state of the art, the national and international practice were analyzed. Its incorporation into the model was evaluated. Criteria and indicators that would allow quantify the condition of the assets were defined. To that purpose these assets were associated to a performance thresholds which were incorporated to the global evaluation of the road that would allow to define a standard of service. A search of new technologies and procedures for measuring were made, which do not represent a relative increase in costs of privatized road infrastructure.

Each chapter in this work deals with one of the road assets studied. Firstly the Bearing Capacity of Pavement (highway asset preservation model), secondly the Bus Stops installation (user model) and finally the phenomenon of Vibration caused by traffic (environment model).

For the first two topics a system of performance assessment through a measuring range was developed. The Bearing Capacity of Pavements were defined through deflection parameter, for flexible pavements the indicator was the maximum deflection in the center of point loading, while for rigid pavements the indicator was the load transfer efficiency. Bus Stops were evaluated according their functionality and/or integrity through a series of defined elements to fulfill.

The contribution to the current bidding condition is the incorporation of actives "Bearing Capacity" and "Bus Stops" to one level of service model. These two actives were evaluated through categories alongside specification of the measuring equipment, normative, methodology and assessment threshold. "Vibration" caused for traffic was dismissed, nonetheless it is suggested that studies of vibration are made in preliminary project stage as well as vibration maps for the concession.

GLOSARIO

Activos viales Son aquellos elementos que permiten el desplazamiento de los usuarios en forma confortable y segura desde un punto a otro, minimizando sus costos y sus externalidades.

AASHTO Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transportes, por sus siglas del inglés American Association of State Highway and Transportation Officials, organismo que hace publicaciones, establece normas, especificaciones y realiza pruebas de protocolos y guías usadas en el diseño y construcción de autopistas.

Barras de traspaso de cargas Barras de acero redondo que se instalan en las juntas de contracción con el objetivo de transferir (distribuir) parte de la carga que solicita una losa a la vecina; se colocan de manera que un extremo quede empotrado y el otro pueda deslizarse.

BLI Índice de capa base, reflejo de la condición estructural de la capa base o capas asociadas a la profundidad evaluada.

Conservación Conjunto de actividades destinadas a preservar la condición de un camino y de sus componentes, tales como capas de rodadura, bermas, estructuras, drenaje, obras básicas, dispositivos de control de tránsito, etc., a fin de que sigan prestando en forma efectiva el servicio para el que fueron dispuestos.

Cuenco de Deflexiones Conjunto de deflexiones, que reflejan la deformada de la superficie de un pavimento, registradas por todos los sensores de un deflectómetro de impacto (FWD) en el momento del ensayo.

Deflexión	Deformación elástica (recuperable) vertical que sufren los pavimentos al ser solicitados por las cargas que impone el tránsito. La deflexión que presenta un pavimento en un determinado momento. Se mide tanto en centésimas de milímetro como en micrones (μm).
FWD	Deflectómetro de Impacto, equipo de ensaye no destructivo que simula mediante un impacto vertical la carga de un vehículo pesado sobre un pavimento, midiendo la deformación vertical elástica a diferentes distancias del punto de impacto.
Gestión de activos	Proceso que tiene por objetivo preservar los activos viales de una red, maximizando los beneficios de los usuarios y de los inversionistas (privados o público), minimizan- do al mismo tiempo los costos de mantenimiento de las agencias viales, bajo un objetivo de calidad común a todos los actores.
HMA	Pavimento con mezclas asfálticas en caliente.
IDIEM	Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales, es un centro de ingeniería y tecnología perteneciente a la Universidad de Chile, realiza labores de ensayos, certificaciones, inspecciones y servicios de ingeniería en el área de construcción.
Indicador de desempeño	Variable numérica para cuantificar el estado, características o desempeño de un activo particular o grupo de ellos considerando su objetivo estratégico.
Índice de vibración	Índice acústico para describir la vibración, que tiene relación con los efectos nocivos producidos por esta.
JPCP	Pavimento de concreto simple con juntas, con o sin barras de transferencia de carga.
JRCP	Pavimento de concreto reforzado con juntas.

MEPDG	Guía de diseño empírico mecanicista de pavimentos, del inglés Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, editada por la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) a través del proyecto 1-37A, herramienta para el análisis y diseño de pavimentos.
MLI	Índice de capa media, reflejo de la condición estructural de la subbase o capa asociada a la profundidad evaluada.
Nivel de desempeño	Rendimiento o calificación que es capaz de alcanzar el activo en su evaluación.Verifica con métricas objetivas la calidad de la infraestructura y sus elementos.
LLI	Índice de capa inferior, reflejo de la condición estructural de las capas bajas y subrasante o capa asociada a la profundidad evaluada.
LTE	Eficiencia de la transferencia de carga en las juntas de un pavimento de hormigón. Representa el grado de interbloqueo entre las losas adyacentes del pavimento.
Parámetro técnico	Variable que se considera como imprescindible y orientativa para lograr evaluar o valorar una determinada situación. A partir de un parámetro, una cierta circunstancia puede comprenderse o ubicarse en perspectiva.
Pavimento	Sistema estructural formado por una o más capas de materiales seleccionados, estabilizados, cementados y/o tratados, que se colocan sobre la subrasante, con el propósito de resistir las cargas impuestas por el tránsito de vehículos, en condiciones de comodidad y seguridad aceptables durante su periodo de diseño, y protegerlas de la acción de las condiciones ambientales.

Pavimento Flexible Pavimento formado por una o varias capas asfálticas y/o materiales seleccionados o tratados, de módulos elásticos decrecientes con la profundidad. Normalmente, la capa de rodadura corresponde a una mezcla asfáltica o a una capa asfáltica de protección y las capas profundas, a materiales granulares del tipo base y subbase. En este caso, las cargas de rueda son resistidas principalmente por la capacidad del sistema de absorber deformaciones, que le es conferida por las características de sus capas constitutivas y del suelo de fundación.

Pavimento Rígido Pavimento formado por una capa de rodadura de alta rigidez y por una base de apoyo de material seleccionado y/o tratado. Esta última se puede omitir si el material de fundación es apropiado. Normalmente, está constituido por losas de hormigón de cemento hidráulico, simple o reforzado, colocadas sobre una subbase de agregado granular. Debido a la rigidez del sistema, las cargas de rueda son soportadas principalmente por la resistencia a la flexión de las losas de hormigón, disipándose ampliamente su efecto en el suelo bajo la subrasante.

PCC Pavimento de concreto de cemento Portland.

PPV Máxima velocidad de partículas.

RMS Media cuadrática, valor cuadrático medio, raíz de la media cuadrática o RMS (del inglés root mean square) es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable.

SHm Sector hectométrico o SHm, corresponde a un hectómetro del área de concesión limitado longitudinalmente por los límites de ésta y transversalmente por dos balizas.

Umbral Valor limite en la escala de evaluación de cada indicador.

Vibración Perturbación producida por un emisor acústico que provoca la oscilación periódica de los cuerpos sobre su posición de equilibrio.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS i

RESUMEN iii

ABSTRACT v

GLOSARIO vii

ÍNDICE DE FIGURAS xviii

ÍNDICE DE TABLAS xxi

1. Introducción 1

1.1. Antecedentes Generales 4

1.2. Objetivos del estudio 5

1.3. Alcances del estudio 6

1.4. Metodología de trabajo 7

1.5. Estructura de memoria 8

2. Capacidad Estructural de Pavimentos 9

2.1. Introducción 9

2.2. Revisión Bibliográfica 10

2.3. Revisión de literatura referida a deflectometría en carreteras 13

2.3.1. Especificaciones de deflectometría en Manual de Carreteras 13

2.3.1.1. Manual de Carreteras Volumen N°3, Instrucciones y Criterios de Diseño 13

2.3.1.2. Manual de Carreteras Volumen N°8, Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control 14
2.3.2. Especificaciones del Instructivo de Inspección Visual de caminos pavimentados 17
2.3.3. Especificaciones de deflectometría en carreteras concesionadas en Chile 18
2.3.4. Especificaciones de deflectometría en carreteras a nivel internacional 19
2.3.4.1. Australia 19
2.3.4.2. Canadá 22
2.3.4.3. Colombia 24
2.3.4.4. España 26
2.3.4.5. México 29
2.3.4.6. Perú 31
2.3.4.7. Sudáfrica 34
2.3.5. Estudios para valores de deflexiones en carreteras 37
2.3.5.1. Estudios Internacionales para Pavimentos Flexibles 37
2.3.5.2. Estudios Nacionales para Pavimentos Rígidos 40
2.3.5.3. Estudios Internacionales para Pavimentos Rígidos 43
2.4. Parámetros técnicos para evaluar la Capacidad Estructural del pavimento 44
2.4.1. Deflexión 44
2.4.2. Módulo Elástico 45
2.4.3. Módulo de Reacción 45
2.4.4. Número Estructural 45
2.4.5. Vida Remanente 46
2.5. Elección del parámetro técnico más apropiado 47
2.6. Indicadores técnicos para evaluar la Capacidad Estructural del pavimento 48
2.6.1. Pavimentos Flexibles 48
2.6.2. Pavimentos Rígidos 51
2.7. Elección del indicador técnico más apropiado 52

2.7.1. Pavimentos Flexibles . . . 52
2.7.2. Pavimentos Rígidos . . . 54
2.8. Equipos para medir la Capacidad Estructural en pavimentos . . . 55
2.8.1. Viga Benkelman . . . 55
2.8.2. Deflectógrafo . . . 56
2.8.3. Curviámetro . . . 58
2.8.4. Deflectómetro de Impacto . . . 58
2.8.5. Traffic Speed Deflectometer . . . 60
2.8.6. Rolling Wheel Deflectometer . . . 62
2.8.7. Road Deflection Tester . . . 63
2.8.8. Dispositivo de medición de deflexión basado en imágenes . . . 64
2.9. Elección del equipo de medición más apropiado . . . 65
2.10. Propuesta de procedimiento de análisis de la capacidad estructural del pavimento para carreteras concesionadas en Chile . . . 67
2.10.1. Longitud de evaluación para mediciones de deflexión . . . 67
2.10.2. Frecuencia de medición de deflexión . . . 68
2.10.3. Desarrollo de una calificación del nivel de servicio asociada al valor de deflexión 69
2.10.3.1. Desarrollo de una evaluación para Pavimentos Flexibles . . . 69
2.10.3.2. Desarrollo de una evaluación para Pavimentos Rígidos . . . 71
2.10.4. Metodología y equipo de medición . . . 72
2.10.4.1. Localización de geófonos . . . 74
2.10.4.2. Unidades . . . 74

3. Paraderos **75**

3.1. Introducción . . . 75
3.2. Revisión Bibliográfica . . . 76
3.3. Revisión de literatura referida a Paraderos en carreteras . . . 77
3.3.1. Especificaciones del servicio de los paraderos en carreteras concesionadas en Chile 77

3.3.1.1. Concesión para el Mejoramiento y Conservación de la Ruta 43 de la Región de Coquimbo (Ministerio de Obras Públicas, 2012) 77

3.3.1.2. Concesión Vial Mejoramiento Ruta G-21 (Ministerio de Obras Públicas, 2017) 79

3.3.1.3. Concesión Ruta 5 Tramo Los Vilos – La Serena (Ministerio de Obras Públicas, 2018) 80

3.3.2. Especificaciones de paraderos en carreteras concesionadas a nivel internacional 82

3.3.2.1. Especificaciones del servicio de los paraderos en carreteras concesionadas en México 82

3.3.3. Estudios Internacionales 83

3.3.3.1. Guide to Road Design Part 6B: Roadside Environment (Austroads, 2015b). 83

3.3.3.2. Pedestrian Safety Guide for Transit Agencies (Federal Highway Administration, 2008). 83

3.3.3.3. Guidelines for the Location and Design of Bus Stops (Transportation Research Board of the National Academies, 1996). 84

3.4. Indicadores técnicos para evaluar paraderos 85

3.4.1. Porcentaje mensual por incumplimiento de exigencias de los paraderos 85

3.4.2. Porcentaje mensual por cumplimiento de exigencias de los paraderos 85

3.4.3. Número de incumplimientos mensuales de las exigencias de los paraderos . . . 86

3.5. Propuesta de procedimiento de análisis de paraderos para carreteras concesionadas en Chile 87

3.5.1. Metodología y forma de medición 87

3.5.1.1. Funcionalidad de Paraderos 87

3.5.1.2. Integridad de Paraderos 88

3.5.2. Desarrollo de una calificación del nivel de servicio asociada a paraderos 89

3.5.2.1. Funcionalidad de Paraderos 89

3.5.2.2. Integridad de Paraderos 90

3.5.2.3. Funcionalidad e Integridad de Paraderos 91

4. Vibraciones **93**

4.1. Introducción 93

4.2. Revisión Bibliográfica 94

4.3. Revisión de literatura referida a vibraciones en carreteras 95

4.3.1. Especificaciones de vibraciones en Manual de Carreteras 95

4.3.1.1. Consideraciones Ambientales a nivel de estudio Preliminar 95

4.3.1.2. Consideraciones Ambientales adicionales en estudios de proyectos de cambio de estándar 101

4.3.1.3. Consideraciones Ambientales durante la construcción de obras viales 104

4.3.2. Estudios Internacionales 105

4.3.2.1. NSW Road Noise Policy (Department of Environment and NSW, 2011).105

4.3.2.2. Medición e interpretación de vibraciones producidas por el tráfico en Bogotá D.C. (Vacca et al., 2011). 105

4.3.2.3. Transit Noise and Vibration Impact Assessment (Federal Transit Administration, 2018). 109

4.3.2.4. Traffic Vibrations in Buildings (Hunaidi, 2000). 114

4.3.2.5. The effect of road unevenness on the dynamic vehicle response and ground-borne vibrations due to road traffic (Lak et al., 2011). 118

4.3.2.6. The generation and propagation of vibration in various soils produced by the dynamic loading of road pavements (Watts, 1992). 121

4.3.3. Normativa Internacional 123

4.3.3.1. REAL DECRETO 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. (Ministerio de la Presidencia, 2007). 123

4.3.3.2. RIVAS Railway-Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative project - Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration (Elias and Villot, 2011). 128

4.4. Indicadores técnicos para evaluar vibraciones en carreteras 131

4.4.1. Velocidad máxima de partículas (PPV) 131

4.4.2. Media cuadrática (Root Mean Square, RMS) 131
4.4.2.1. Velocidad cuadrática media 132
4.4.2.2. Aceleración cuadrática media 132
4.4.3. Niveles de vibración 133
4.4.3.1. Nivel de velocidad de vibración 133
4.4.3.2. Nivel de aceleración de vibración 134
4.5. Elección del indicador técnico más apropiado 135
4.6. Propuesta para vibraciones en pavimento para carreteras concesionadas en Chile . . . 136

CONCLUSIONES **137**

REFERENCIAS **144**

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. *Zona de muestreo para pavimentos de hormigón* 17

2.2. *Gráfico de deflexiones admisibles y críticas en proyectos peruanos.* 32

2.3. *Correlación entre parámetros del cuenco de deflexión y vida remanente.* 38

2.4. *Relación Índice de curvatura superficial – Deflexión Máxima.* 39

2.5. *Relación de Deflexión – Deflexión Máxima.* 39

2.6. *Transferencia de carga en función de la temperatura media de la losa según la época del año.* 40

2.7. *Transferencia de carga en función de la temperatura según la ubicación geográfica.* . . 41

2.8. *Parámetros de área del cuenco de deflexión.* 50

2.9. *Zonas de curvatura para un cuenco de deflexión.* 52

2.10. *Dispositivo Viga Benkelman.* 56

2.11. *Dispositivo Deflectómetro Lacroix adquirido por Chile.* 57

2.12. *Dispositivo Deflectómetro Lacroix moderno.* 57

2.13. *Dispositivo Curviámetro.* 58

2.14. *Dispositivos FWD de diferentes proveedores.* 59

2.15. *Dispositivo TSD* 60

2.16. *Conductor y Operador del TSD* 61

2.17. *Dispositivo RWD* 62

2.18. *Primer plano del sensor láser colocado entre neumáticos duales* 62

2.19. *Dispositivo RDT* 63

2.20. *Dispositivo IDM* 64

2.21. *Zona de muestreo pavimentos rígidos* 72

4.1. *Acelerómetros sísmicos usados para la instrumentación.* 107

4.2. *Límites asociados con confort en función de la frecuencia del registro.* 108

4.3. *Niveles típicos de vibración en el suelo.* 110

4.4. *Comparación entre los niveles de vibración inducidos por el tránsito de un autobús y un camión. Los niveles de vibración son significativamente diferentes debido a las diferencias en los sistemas de suspensión.* 115

4.5. *Efecto de la variación de la rigidez del pavimento en los niveles de vibración. Las estructuras de carreteras más rígidas no disminuyen significativamente los niveles de vibración en las frecuencias que afectan más a las casas (8 a 15 Hz).* 117

4.6. *Pavimentos considerados en el estudio: (a) Pavimento JPCP deteriorado, (b) pavimento JPCP rehabilitado, (c) pavimento JPCP, (d) pavimento de bloques de concreto, (e) y (f) pavimentos de adoquines.* 118

4.7. *Pavimentos considerados en el estudio: (a) Pavimento JPCP deteriorado, (b) pavimento JPCP rehabilitado, (c) pavimento JPCP, (d) pavimento de bloques de concreto, (e) y (f) pavimentos de adoquines.* 119

4.8. *Variación del módulo de la función de transferencia a 12 Hz para dos tipos de construcción de carretera en suelo aluvial. (círculo negro) Bituminoso (espesor 210 mm); (circulo blanco) Hormigón (espesor 260 mm).* 121

4.9. *Variación del módulo de función de transferencia (vertical) a 12 Hz con la distancia.* . . 122

4.10. *Señal de vibración en unidades absolutas* 132

4.11. *Señal en términos de decibeles de velocidad RMS* 133

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Precisión de los datos en auscultaciones de Australia 20

2.2. Parámetros del cuenco de deflexión utilizados en Colombia 24

2.3. Valores mínimos y máximos del parámetro área del cuenco de deflexión utilizado en Colombia 25

2.4. Rangos del parámetro AREA según la estructura del pavimento para Colombia 25

2.5. Valores para IDB e ICB para condiciones del pavimento en Colombia 25

2.6. Adaptado de Umbrales del valor puntual de la deflexión 28

2.7. Adaptado de Umbrales para valores característicos 28

2.8. Categorías de tráfico pesado de España 28

2.9. Rangos de valores representativos de deflexiones para la clasificación de los segmentos carreteros a 700 Kilopascales y 20 grados Celsius en concesiones de México 30

2.10. Deflexiones de modelo de contrato de prestación de servicios para conservación de carretera en México 30

2.11. Adaptación Tabla 14 de TRH12 - Longitud de evaluación para carreteras de Sudáfrica 34

2.12. Adaptación de tabla 12 del SAPEM Capítulo 6 - Estados de comportamiento del pavimento utilizado en Sudáfrica 36

2.13. Criterios de condición estructural para parámetros del cuenco de deflexión para varios tipos de pavimentos 36

2.14. Mediciones de deflexión en juntas y grietas en pavimentos de hormigón 36

2.15. Calificación para eficiencia de transferencia de carga en porcentajes (Cabrera, 1998) . 42

2.16. Adaptado de Tabla 5-1.20, niveles de deterioros recomendados para evaluar el estado de la junta de PCC. 43

2.17. Resumen de indicadores técnicos (1/2), adaptado de Tabla I: parámetros del cuenco de deflexión de Horak et al. (2015). 48

2.18. Resumen de indicadores técnicos (2/2) adaptado de Tabla I: parámetros del cuenco de deflexión de Horak et al. (2015). 49

2.19. Tendencia del estado del pavimento según combinación de indicadores A_{upp} y D_0 (García, sf). 50

2.20. Tendencia del estado del pavimento según combinación de indicadores A y D_0 (García, sf). 50

2.21. Indicadores técnicos más apropiados. 53

2.22. Longitud entre mediciones de deflexión FWD. 67

2.23. Calificación para valores de deflexión máxima D_0 en carreteras con mayor a 20 millones de EE de diseño. 69

2.24. Calificación para valores de deflexión máxima D_0 en carreteras con mayor a 10 y menor a 20 millones de EE de diseño. 69

2.25. Calificación para valores de BLI. 70

2.26. Calificación para valores de MLI. 70

2.27. Calificación para valores de LLI. 70

2.28. Calificación para eficiencia de transferencia de carga. 71

2.29. Calificación del indicador D_0 o TC % para la recepción de la construcción. 73

2.30. Calificación del indicador D_0 o TC % para fase de explotación. 73

2.31. Adaptado de Tabla 1, distancias para sensores de deflexión para FWDs de nueve sensores. 74

2.32. Adaptado de Tabla 2, distancias para sensores de deflexión en FWDs de 7 sensores. . . 74

3.1. Ficha de instalaciones base licitación Ruta 43 78

3.2. Programación para la conservación de las áreas de servicios generales, áreas de atención de emergencias, miradores y plaza de pesaje. 81

3.3. Método de cálculo de la deducción mensual. 82

3.4. Calificación por nivel de desempeño para resultados del indicador funcionalidad de paraderos. 89

3.5. Calificación por nivel de desempeño para resultados del indicador integridad de paraderos. 90

3.6. Calificación por nivel de desempeño para resultados del indicador funcionalidad e integridad de paraderos. 91

4.1. Distancias mínimas para la definición de área de influencia. 96

4.2. Relación entre la distancia y aceleración vibratoria. 97

4.3. Corrección por velocidad. 98

4.4. Corrección por programación sobre suelos diversos. 98

4.5. Corrección por acoplamiento entre el edificio receptor y el suelo. 98

4.6. Clasificación de impactos debido a vibraciones. 99

4.7. Clasificación de impactos debido a vibraciones. 102

4.8. Valores máximos de velocidad de partícula (mm/s) para evitar daños (Norma DIN 4150).106

4.9. Valores máximos de velocidad de partícula establecidos en la referencia (ITME, 1985). 106

4.10. Factores que influyen en los niveles de vibración y ruido transmitidos por el suelo según la fuente. 111

4.11. Factores que influyen en los niveles de vibración y ruido provinientes del suelo a lo largo del camino, de la Tabla 5-3 de la Federal Transit Administration (2018). 112

4.12. Factores que influyen en los niveles de vibración y ruido transmitidos por el suelo en el receptor, de la Tabla 5-4 de la Federal Transit Administration (2018). 112

4.13. Road class, IRI, CP_1.25, valor medio RMS de la aceleración del cuerpo del camión, y máximo valor RMS de la velocidad del suelo para las diferentes superficies. Todos los valores están expresados como un porcentaje del valor máximo predicho. Los valores entre paréntesis son derivados de mediciones. 120

4.14. Objetivos de calidad acústica para vibraciones aplicables al espacio interior habitable de edificaciones destinadas a vivienda, usos residenciales, hospitalarios, educativos o culturales. 124

4.15. Ponderación w_m Ministerio de la Presidencia (2007). 125

4.16. Criterios de vibración en horario nocturno en edificios residenciales (w_m aceleración ponderada en mm/s^2). 130

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Las concesiones de obra pública son contratos administrativos destinados a la construcción, conservación y operación de una obra pública que tiene una normativa legal única para regular su ejecución, reparación y mantención. Estas son reguladas en el DS MOP N°9000 de 1996.

La Ley de Concesiones de Obras Públicas se promulgó en Chile hace ya más de 22 años, este modelo de desarrollo está presente desde el año 1993 por la construcción del túnel El Melón en la región de Valparaíso, obra que abrió camino a un exitoso desarrollo de infraestructura en el país, contabilizando ya más de 90 contratos, destacando la construcción de mas de 3.000 kilómetros de autopistas, la gestión de 11 terminales aeroportuarias, entre otras obras emblemáticas que incluyen hospitales, cárceles y embalses. Esta asociaciones público-privadas han demostrado su capacidad de generar beneficios productivos, económicos y sociales para el país.

Entre las ventajas que tiene un sistema de concesión de obras públicas se señalan las siguientes:

- En un contexto presupuestario restringido la concesión permite incorporar la inversión privada. Las necesidades de financiamiento de la infraestructura de transporte han crecido enormemente. La solución pasa por establecer un vínculo entre la tarificación de la infraestructura y su financiamiento.

- Permite ligar la realización de la obra con el mantenimiento y la explotación, de manera que una obra bien concebida será mejor realizada y explotada. El concesionario asume los riesgos técnicos, financieros y comerciales ligados a que la obra cumpla efectivamente su función. Como contrapartida, el concesionario tiene que asegurar la rentabilidad de los capitales que invierte y su remuneración tiene que ser suficiente y competitiva con el mercado monetario, donde se pueden obtener rendimientos elevados en el corto plazo.

- Por último, la concesión de servicios que permite sustituir las limitaciones de la gestión administrativa por una lógica empresarial.

Según el libro de concesiones de obras públicas en Chile, de la Coordinación de Concesiones de Obras Públicas, "Un nuevo consenso en las concesiones de obras públicas supone considerar, al menos, cuatro desafíos. Por un lado, mejorar la calidad de servicio e instancias de participación ciudadana en las obras, estableciendo estándares claros para las obras y su explotación. Asimismo, crear una nueva institucionalidad, acorde al nivel de desarrollo actual de concesiones y los desafíos por delante, para lo cual se envía al Congreso el proyecto de ley que crea la Dirección General de Concesiones. Tercero, definir aspectos operacionales tales como la política y gestión tarifaria, y los mecanismos para mejorar obras durante el periodo de concesión. Por último, aumentar el financiamiento disponible para nuevas obras públicas objetivo que se espera concretar con la aprobación del fondo de infraestructura, ya enviado al Congreso Nacional".

En este sentido, gracias a la experiencia obtenida en estos años desarrollando el modelo de concesiones, es que se pretende establecer mejores mecanismos de gestión y control, adecuados para las nuevas necesidades del progreso y que permitan contribuir a él, particularmente ante el primer desafío, es que el proyecto FONDEF IT16I10008 busca generar una propuesta de evaluación global de gestión de activos de la concesión que mejore las bases de licitación actuales que se rigen por niveles de servicio, entre las cuales destacan las bases de licitación de Concesión camino Nogales Puchuncaví, Concesión para el mejoramiento y conservación de la Ruta 43 (Región de Coquimbo), túnel El Melón, y Concesión vial mejoramiento Ruta G-21. En consecuencia, este trabajo está alineado con el primer desafío de las nuevas concesiones, es decir, establecer estándares claros para las obras y su posterior explotación.

De las concesiones antes nombradas, es que se verifica que el enfoque de gestión basado en modelos de servicio se encuentra desarrollado de manera incipiente. Esta necesidad motivó a las instituciones Universidad Técnica Federico Santa María y Universidad de Concepción, junto a la Coordinación General de Concesiones formular el proyecto FONDEF IT16I10008 titulado "Modelo para evaluar los niveles de servicio de carreteras en Chile, implementable en bases de licitación para nuevas concesiones", que se ejecuta desde junio del año 2016 para que impulse el uso de tecnologías desarrolladas en nuestro país y que además incentive un mejoramiento continuo en la gestión de la red vial.

Bajo el contexto del desarrollo de la infraestructura vial, si bien sigue siendo prioritario mejorar técnicas y procesos constructivos a través de modelos de gestión de obras, la atención se vuelca hacia la toma de decisiones durante la operación de las carreteras, implementando procedimientos que permitan conocer el comportamiento del estado de la infraestructura y generando los mecanismos que permitan su mantención a lo largo del tiempo bajo el concepto denominado nivel de servicio.

Para ello, el proyecto FONDEF contempla las siguientes etapas:

- Etapa 1: actualización del estado del arte y de la práctica. Contempla el análisis del estado del arte y la práctica realizado en la postulación del proyecto, identificando brechas tecnológicas entre Chile y sistemas de concesiones viales de referencia orientados al nivel de servicio.
- Etapa 2: desarrollo de modelo para evaluar el nivel de servicio. Se seleccionarán las variables de interés a medir relacionadas con el servicio a los usuarios, los indicadores asociados, umbrales aceptables y metodologías de medición.
- Etapa 3: implementación de modelo para evaluar el nivel de servicio. Se prepararán los modelos de bases de licitación orientadas a nivel de servicio, en formatos tales que puedan ser fácilmente incorporados en nuevas bases de licitación de vías concesionadas. Se redactarán los protocolos de auscultación, procesamiento, evaluación y gestión de datos.

Esta memoria se enmarca entre la etapa 2 y 3 del FONDEF, desde la selección de indicadores, umbrales y metodologías de medición, hasta el modelo de evaluación de los datos. Conceptualmente el método de evaluación por niveles de servicios está compuesto por 3 modelos, "Conservación del Patrimonio", "Servicio al Usuario" y por último "Comunidad aledaña y Medio Ambiente", cada uno de ellos contiene variables de interés asociada a su temática y aportarán los datos que finalmente se configurará en una nota particular a cada activo que ponderados en su modelo, otorgará una nota global por nivel de servicio resultado de la combinación de la calificación de cada modelo.

Particularmente este trabajo investiga la Capacidad Estructural de los pavimentos, las instalaciones de Paraderos y el fenómeno de Vibraciones generadas por el tránsito vehicular.

Cabe destacar que la Capacidad Estructural es parte de los activos de plataforma vial del modelo Conservación del Patrimonio, el activo Paraderos perteneciente al modelo de Servicio al Usuario y Vibraciones que será estudiado en el marco del modelo de Comunidad Aledaña y Medio Ambiente. Estos serán estudiados en esta memoria para su incorporación al modelo mediante sus respectivos parámetros técnicos, de acuerdo con los indicadores definidos para su evaluación. La investigación incluirá una propuesta de evaluación e indicadores de desempeño para su incorporación al modelo de niveles de servicio.

1.1. Antecedentes Generales

Proyectos previos desarrollados por el Departamento de Obras Civiles de la UTFSM (Fondef D09i1174 e Innova 11BPC-10220) y por la Universidad de Concepción (Fondef D03I-1042) han desarrollado tecnologías y resultados relevantes en el área de ingeniería de caminos. Estos resultados tienen el potencial de generar incrementos significativos en la calidad del servicio que prestan las carreteras. Las tecnologías desarrolladas incluyen materiales de alto desempeño, características funcionales y de seguridad de los diseños.

Existen brechas relevantes entre el nivel de servicio que entregan las carreteras concesionadas chilenas y el nivel de servicio que se puede entregar a los usuarios con las tecnologías disponibles en la actualidad en nuestro país. Acortalas, es nuestro propósito, con el desarrollo de un modelo para evaluar el nivel de servicio de carreteras implementable y aplicable a concesiones viales chilenas a través del establecimiento y exigencia de niveles de servicio superiores a los actuales, basados en la experiencia de estos 20 años de concesiones, proyectos e investigaciones nacionales e internacionales.

El servicio prestado por las vías concesionadas a los usuarios puede ser mejorado sin que se incrementen significativamente los costos totales en el ciclo de vida de las carreteras, mediante la definición de modelos apropiados para la evaluación del nivel de servicio y la incorporación de mejoras tecnológicas.

Cabe resaltar que no es factible adoptar directamente un esquema de concesión por nivel de servicio de otro país hacia Chile dadas las particularidades técnicas, económicas y jurídicas del País y de su estructura de gestión vial, por lo cual es necesario adaptar más que adoptar.

El proyecto FONDEF IT16I10008 titulado “Modelo para evaluar los niveles de servicio de carreteras en Chile, implementable en bases de licitación para nuevas concesiones”, busca incorporar mejoras tecnológicas desarrolladas en los proyectos previamente señalados, que podrían establecer una mayor exigencia que la presente hoy en día en el nivel de servicio de las carreteras chilenas, pretende definir indicadores para la evaluación de las distintas variables relacionadas con los estándares de servicio de carreteras, particularmente esta memoria los definirá para la capacidad estructural y paraderos, mientras que para la vibración generada por el tránsito que circula por la vía, se evaluará su potencial incorporación.

Con el desarrollo de esta memoria, sumada a la de todos los integrantes del proyecto, se conformarán los indicadores a evaluar la concesión en su conjunto, resultando un modelo global que defina el estándar de servicio de la carretera.

1.2. Objetivos del estudio

Objetivos Generales

- Proponer metodología de evaluación según el desempeño de la capacidad estructural de pavimentos, el servicio prestado por los paraderos y determinar si es necesaria la incorporación del fenómeno de vibraciones generadas por el tránsito al modelo de evaluación por niveles de servicio en carreteras concesionadas de Chile.

Objetivos Específicos

- Para evaluar capacidad estructural, incorporar un análisis por capas en pavimentos flexibles y en términos de eficiencia de traspaso de carga en pavimentos rígidos.
- En paraderos evaluar el servicio prestado a la comunidad aledaña y su integridad dentro de la conservación del patrimonio.
- Identificar nuevas tecnologías y metodologías de medición de alto rendimiento que permitan estudiar la capacidad estructural de los pavimentos, que se adecúen a las necesidades del proyecto y evaluar su factibilidad de implementación.
- Desarrollar propuestas que contengan métodos de medición, instrumentación, umbrales y nivel de desempeño adoptados para la capacidad estructural de los pavimentos y paraderos.

1.3. Alcances del estudio

Esta memoria se enmarca dentro del proyecto FONDEF IT16I10008 titulado “Modelo para evaluar los niveles de servicio de carreteras en Chile, implementable en bases de licitación para nuevas concesiones” ejecutado por las instituciones Universidad Técnica Federico Santa María y Universidad de Concepción, junto a la Coordinación General de Concesiones.

Los temas desarrollados comprenden el estudio de la capacidad estructural del activo plataforma vial en conjunto con el activo paraderos, para la incorporación de éstos al modelo de servicio mediante la definición de sus respectivos parámetros técnicos, de acuerdo a los indicadores a establecer para su evaluación. La investigación incluirá una propuesta de evaluación para los indicadores de desempeño para bases de licitación de nuevas concesiones.

Se identificarán tecnologías desarrolladas en Chile y el extranjero para la verificación de las exigencias definidas para incentivar un mejoramiento en la gestión de la red vial.

Otra arista considerada en esta memoria consiste en el estudio del fenómeno de vibraciones generadas por el tránsito vial, cuya finalidad es analizar su potencial incorporación al modelo, verificando metodologías y/o prácticas internacionales comparándolas con las aplicadas en Chile.

1.4. Metodología de trabajo

- Redactar informes que contengan la información necesaria que justifique la incorporación o descarte de la propuesta de evaluación para cada uno de los activos viales (parámetro evaluador escogido, método de medición, umbrales) y de ellos resumir los principales aspectos en una ficha técnica.
- Realizar una revisión bibliográfica del estado del arte y práctica nacional e internacional respecto a la evaluación del desempeño de la capacidad estructural de pavimentos, serviciabilidad de los paraderos y el fenómeno de vibraciones, esto incluye manuales, normativas, estándares, investigaciones y todo tipo de documento relacionado con los temas de estudio.
- En base a la revisión bibliográfica, reuniones con expertos y discusiones con el equipo de trabajo del proyecto, establecer los parámetros, metodologías y equipos para la evaluación de los temas a estudiar. Escoger los parámetros que se adecúen al proyecto, es decir, que se puedan incluir o bien descartar del modelo.
- Realizar reuniones periódicas de trabajo con el equipo técnico del proyecto para validar el trabajo realizado y asegurar consistencia con el resto de los indicadores viales que se estudian dentro del proyecto.
- Definir umbrales acordes al avance tecnológico y normativo de país y describir el método de medición asociado para evaluar el desempeño de la capacidad estructural del pavimento y la serviciabilidad de los paraderos, realizando análisis de sensibilidad sobre datos de estudio de pavimentos o estadísticas de carreteras chilenas.
- Conformar reuniones con personal experto en la gestión de los diversos activos de la infraestructura vial para retroalimentación y validación de las propuestas de evaluación del desempeño de la capacidad estructural del pavimento y la serviciabilidad de los paraderos.

1.5. Estructura de memoria

El presente documento fue estructurado se la siguiente manera:

En el capítulo 2 se desarrolla el tema de Capacidad Estructural del pavimento, en el cual se revisa la literatura asociada a normativa y especificaciones referidas a la evaluación del tema del capítulo en cuanto a lo establecido en el país y agencias internacionales. Se realiza una selección de un parámetro adecuado para evaluarla y su indicador asociado tanto para pavimentos rígidos como flexibles. Se efectúa una búsqueda y elección de equipos para medir la Capacidad Estructural. Se genera una propuesta de procedimientos de análisis para evaluar la capacidad estructural del pavimento para carreteras concesionadas en Chile, considerando metodología, equipo de medición y el desarrollo de una calificación del nivel de servicio.

El capítulo 3 presenta el tema de Paraderos en carreteras, el que incluye una revisión de la literatura nacional e internacionalmente referida a paraderos para su evaluación en concesiones. La selección de un indicador para evaluarlos. Se genera una propuesta de procedimientos de análisis para evaluar del pavimento para carreteras concesionadas en Chile, considerando metodología, forma de medición y el desarrollo de una calificación del nivel de servicio.

En el capítulo 4 se realiza la evaluación de la incorporación del tema Vibraciones (generadas por el tránsito de los vehículos en la carretera), en el cual se revisa la literatura asociada a normativa y especificaciones referidas al tema del capítulo en el país y agencias internacionales. Se presenta una selección de un indicador adecuado para evaluarlo. Se genera una propuesta para el análisis de las vibraciones en concesiones.

Capítulo 2

CAPACIDAD ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

2.1. Introducción

Los estudios internacionales destacan la correlación entre evaluaciones de la capacidad estructural con diversos deterioros del pavimento, por ello es que agencias han investigado y desarrollado programas de mantenimiento y/o rehabilitación en función de los parámetros e indicadores que proporciona su análisis.

En Chile existe la tecnología para realizar estudios y seguimiento del comportamiento de pavimentos a través de la capacidad estructural a nivel de proyecto, y si se hacen los esfuerzos, es posible acudir a nuevas tecnologías que permitirían realizar una evaluación a nivel de red. Se trabajó sobre una base de datos de seguimientos del comportamiento de pavimentos proporcionada por el Laboratorio Nacional de Vialidad y estudios del IDIEM.

Esta memoria propone la aplicación de exigencias relacionadas a indicadores de capacidad estructural que permitan garantizar una conservación del estado de los pavimentos y su valor patrimonial enfocada en una concesión vial.

La investigación destaca la necesidad de continuar con el estudio y seguimiento del comportamiento de pavimentos para establecer protocolos y exigencias a pavimentos nuevos o ya existentes, generar umbrales de aceptación y mantención durante la operación de una carretera son objetivos que deben ajustarse a medida que se tenga mayor conocimiento del comportamiento de nuestras estructuras y posiblemente diferenciar entre ellas y sus alcances de diseño.

2.2. Revisión Bibliográfica

Austroads. (2008). Guide to Asset Management Part 5D: Strength. Australia.
Contiene una guía sobre la auscultación y datos de reportes de deflexión a nivel de red, para fines de gestión de redes de carreteras en Australia y Nueva Zelanda. Se analizan la frecuencia y el alcance de las mediciones de deflexión, incluidos problemas como la selección de intervalos de muestreo longitudinales o las proporciones de muestreo para las auscultaciones de deflexión.

Cabrera, C. (1998). Memoria para optar al título de Ingeniero Civil - Calibración del modelo de agrietamiento para pavimentos de hormigón simple implementado en el sistema GIMPh, Universidad de Chile, 1998.
El objetivo del estudio es la calibración del modelo, utilizando para ello la base de datos existente compuesta por 21 Zonas Testigo ubicadas desde la quinta región a la décima, la cual contiene el seguimiento sistemático y sostenido a contar de su fecha de construcción.

Dirección de Vialidad (2017). Manual de Carreteras. Chile
Documento de carácter normativo, que sirve de guía para las diferentes acciones que son de competencia técnica del Servicio. Establece criterios, procedimientos, especificaciones y métodos que indican las condiciones por cumplir en los proyectos y demás actividades viales, en las diversas fases que conforman el ciclo de vida de un proyecto. Dentro del Volumen N°3, "Instrucciones y Criterios de Diseño", se presentan antecedentes sobre la prospección de pavimentos mediante el FWD para la rehabilitación de los mismos. En el Volumen N°8 "Especificaciones y Métodos de muestreo, ensaye y control", se establecen los métodos para medir deflexiones mediante FWD, describe y da recomendaciones para la evaluación de la estructura del pavimento.

European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research. (2007). COST 354 Performance Indicators for Road Pavements WP 2: "Individual Performance Indicators".
Define indicadores de rendimiento correspondiente a propiedades clave para pavimentos de carreteras en Europa, teniendo en cuenta las necesidades de los usuarios y los operadores de las carreteras. Evalúa diferentes aspectos del desempeño del pavimento, a través de la implementación de indicadores que reflejen las necesidades presentes y futuras de diseño y mantenimiento.

FHWA. (2012). Introduction to Mechanistic – Empirical Design of New and Rehabilitated Pavements. Reference Manual; NHI Course 131064; Illinois.
Este módulo utilizado presenta pautas para la evaluación estructural de los pavimentos existentes antes de la rehabilitación. Los resultados de la evaluación estructural se utilizarán para determinar la idoneidad estructural del pavimento existente y la viabilidad de varias alternativas de rehabilitación.

FHWA. (2012). Simplified Techniques for Evaluation and Interpretation of Pavement Deflections for Network-Level Analysis. Estados Unidos.
El estudio desarrolla un enfoque para incorporar técnicas utilizadas para interpretar y evaluar datos de deflexión para aplicaciones de sistemas de gestión de pavimento a nivel de red. La investigación se centró en identificar y evaluar las técnicas existentes mediante la búsqueda de aquellas que eran simples, confiables y fáciles de incorporar en las prácticas actuales de gestión, así como aquellas que produjeron resultados consistentes. La investigación detalla el desarrollo de pautas para la aplicación de las técnicas recomendadas, junto con los procedimientos para determinar el espaciamiento de la prueba y la frecuencia de recolección de datos del FWD.

Flintsch, G., Katicha, S., Bryce, J., Ferne, B., Nell, S., & Diefenderfer, B. (2013). Assessment of Continuous Pavement Deflection Measuring Technologies. Estados Unidos.
Evalúa tecnologías actuales implementadas en diferentes tipos de dispositivos de medición de la deflexión continua, identifica dispositivos prometedores para respaldar efectivamente las decisiones de gestión del pavimento, evalúa las capacidades de estos dispositivos e identifica su aplicación para apoyar la gestión del pavimento.

Horak, E. (2008). Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. Sudáfrica.
Presenta una metodología desarrollada en Sudáfrica, combina una técnica de análisis semi-mecanicista y semi-empírica en la que los parámetros del cuenco de deflexión son medidos con el FWD, para brindar orientación sobre los estados individuales de las capas del pavimento determinando la condición estructural de éste y precisar las necesidades de rehabilitación a lo largo y en profundidad.

Ministerio de Fomento (2007). Pliego de cláusulas administrativas particulares. España.
Remite el modelo tipo de cláusulas administrativas que ha de regir según la Dirección General de Carreteras para los contratos de concesión de obras públicas para la conservación y explotación de autovías.

Ministerio de Obras Públicas. Bases de Licitación Concesiones Ruta 43 (2012), Nogales-Puchuncaví (2015) y Ruta G-21 (2018)
Contienen las bases administrativas, técnicas y económicas que regirán las concesiones para la ejecución, reparación, conservación y explotación de la obra pública fiscal; el uso y goce sobre bienes nacionales de uso público o fiscales, destinados a desarrollar la obra entregada en concesión y las áreas de servicios que se convengan.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2018). Licitación Pública Internacional Número APP-009000959-E12-2018. México.
Modelo de contrato de prestación de servicios para la conservación de carretera en términos de la Ley de Asociaciones Público - Privadas según estándares de desempeño.

South African National Roads Agency SOC Ltd. (2014). South African Pavement Engineering Manual Chapter 10 Pavement Desing. Sudáfrica.

Manual que cubre aspectos del diseño y seguimiento de pavimentos, incluída la estimación de la capacidad estructural para pavimentos flexibles y rígidos. Las secciones de diseño e investigación de pavimentos cubren tanto el diseño nuevo como el de rehabilitación, y analizan rendimiento y la capacidad de mantenimiento. Se describen los métodos de estimación de la capacidad estructural para pavimentos flexibles, incluidos el método de diseño empírico-mecanicista sudafricano, así como otros métodos utilizados en Sudáfrica. Se proporciona la idoneidad de todos los métodos de estimación de capacidad estructural para aplicaciones particulares.

2.3. Revisión de literatura referida a deflectometría en carreteras

Resulta importante conocer el estado de la práctica en términos del seguimiento del comportamientos del pavimentos a través de deflectometría, para ello se revisa el propio Manual de Carreteras, instructivos de inspección, contratos de carreteras concesionadas existentes nacionales e internacionales.

2.3.1. Especificaciones de deflectometría en Manual de Carreteras

El Manual de Carreteras posee diversos puntos en los que proporciona información referida a la auscultación y metodología para medir deflexiones. A continuación, se enumeran las secciones involucradas:

2.3.1.1. Manual de Carreteras Volumen N°3, Instrucciones y Criterios de Diseño

Del MC-V3 3.603.205 (3) del Manual de Carreteras, Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño (Dirección de Vialidad, 2018a):

3.603.205 (3) Prospección para Rehabilitación de Pavimentos: En la prospección de suelos para la rehabilitación de pavimentos existentes y para reconstruir pavimentos, deben preferirse ensayes no destructivos mediante mediciones con deflectómetros de impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD), complementadas con algunas calicatas.

Ante la imposibilidad de ejecutar ensayes con un deflectómetro de impacto, la segunda opción debe ser una prospección dirigida a utilizar un método de diseño basado en deformaciones elásticas superficiales, tal como mediciones con una viga Benkelman, un deflectómetro Lacroix, un Dynaflect, un Road Rater-Modelo 400 u otros.

Sólo cuando ninguna de las alternativas anteriores resulten factibles, la prospección podrá centrarse exclusivamente en calicatas.

No podrá prescindirse de calicatas cuando se trate de analizar la existencia de suelos susceptibles a las heladas en zonas sometidas a ciclos de hielo - deshielo, ya que se requiere la extracción de muestras de suelo para ensayes de laboratorio.

La programación de una prospección mediante deflectómetro de impacto, deben tener en cuenta las siguientes consideraciones de orden general:

- los ensayes deben realizarse según una secuencia más o menos fija en cuanto cantidad y posición; para condiciones normales se recomienda realizar 10 mediciones por km y por calzada (con un mínimo de 8 mediciones por km), alternando y desfasando las mediciones entre una y otra pista.
- las mediciones que se realicen en secciones en que el pavimento se encuentra muy deteriorado por causas que evidentemente guardan relación con fallas de la obra básica, sólo deben utilizarse para analizar problemas de la subrasante y no incluirse como un antecedente para deducir propiedades de las capas estructurales.
- debe ejecutarse una monografía dividiendo el trazado en tramos en terraplén y en corte, considerando que terraplenes de alturas inferiores a unos 0,30 m deben agruparse junto con los tramos en corte, pues su aporte es despreciable.
- los resultados que derivan del retroanálisis de las mediciones son muy sensibles a los espesores que se hubieren adoptado para las diferentes capas que conforman la estructura de pavimento que se está analizando. En consecuencia, es de la mayor importancia asegurarse que los espesores adoptados corresponden efectivamente a los reales, por lo que se recomienda ejecutar, tan cerca como sea posible de los puntos donde se haga deflectometría, al menos 4 mediciones de espesor por km de camino; pueden consistir de piques al borde del pavimento o de preferencia, testigos del pavimento que alcancen hasta la subrasante.
- los módulos elásticos calculados mediante retroanálisis a partir de medidas de deflexiones, corresponden a valores del módulo dinámico, en circunstancias que el método de diseño AASHTO utiliza parámetros estáticos. La transformación de uno al otro es función del tipo de suelo en que se hizo la medición; por consiguiente, se recomienda ejecutar al menos una calicata de 1,5 m de profundidad por km, cuando se trata de suelos granulares y de 2 ó más para suelos finos, para definir la estratigrafía de los suelos encontrados y su clasificación.

2.3.1.2. Manual de Carreteras Volumen N°8, Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control

Del MC-V8 8.502.5 del Manual de Carreteras, Volumen N°8, Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control (Dirección de Vialidad, 2018b):

8.502.5 MC-V8 Auscultaciones y prospecciones: Métodos para medir deflexiones mediante el deflectómetro de impacto (FWD). Este método abarca en general los temas relacionados con las mediciones de deflexión en superficies pavimentadas o sin pavimentar con el Deflectómetro de Impacto. Describe y da recomendaciones generales para la evaluación de la respuesta en deflexiones verticales, que es posible medir en la superficie de la estructura por auscultar, cuando se le aplica en forma controlada una carga de impacto.

Algunos puntos importantes de este acápite son:

- Estos ensayes se realizan para obtener información que permita evaluar la capacidad de una estructura de pavimento, determinar la capacidad de soporte del suelo de fundación o subrasante, estimar la capacidad estructural y las propiedades de los materiales de cada capa en forma individual, estimar la transferencia de carga en juntas y grietas de pavimentos de hormigón o pavimentos compuestos (recapados), determinar en forma estadística secciones de pavimento con diferente comportamiento, para el control en diferentes etapas de la construcción de una estructura de pavimento (coronamiento de terraplén, subrasante, subbase, base, capas de rodadura, etc.), para la detección de vacíos bajo las losas de hormigón y para fines receptivos.
- Del resumen del método:
  - Esta instrumentación deberá ser capaz de medir las diferencias de desplazamiento, que se generan entre el reposo inicial y la máxima deflexión alcanzada durante el impacto en cada punto de medición. Deben realizarse al menos dos mediciones sin contar la carga de asentamiento con diferentes alturas de caída de la masa, antes de retirar el plato y los sensores.
  - En todos los controles se debe registrar la temperatura de la estructura. Esta información es indispensable para la posterior normalización de las deflexiones a 20°C y 50 kN.
- De la Seguridad:
  - En este Método no se describen los temas relacionados con seguridad asociados con su uso. Será de responsabilidad del encargado de operar los equipos poner en práctica las medidas de seguridad estipuladas y establecer las condiciones de operación apropiadas para determinar limitaciones reguladoras antes del inicio del ensaye. Tanto el vehículo de ensaye, así como todos los equipos e instrumental que lo complementan, deben cumplir la legislación vigente.
- De los Lugares de Ensaye se define: Los lugares y el número de ensayes dependen del nivel de muestreo seleccionado. Se sugieren los siguientes tres niveles de muestreo:
  - **Nivel 1.** Este nivel provee una impresión general de la condición del pavimento con una cantidad de ensayes limitada. Los ensayes deben realizarse a intervalos entre 200 m y 500 m, dependiendo de las condiciones que presente el pavimento; por cada sección uniforme se recomienda un mínimo de 5 a 10 ensayes para asegurar una muestra estadísticamente significativa. Para concretos asfálticos y hormigones continuamente reforzados, como mínimo, la carga debe ubicarse a lo largo de la huella externa de la pista por evaluar, o alternativamente a lo largo del eje de las losas continuamente reforzadas. Para hormigones simples con juntas, la carga debe ubicarse en el centro de la losa. Al menos el 5 % de las losas en evaluación deben ser ensayadas en sus juntas, para medir su eficiencia en la transferencia de carga.

- **Nivel 2.** Este nivel provee un análisis más detallado del pavimento, por ejemplo, para el uso de la información en un diseño de rehabilitación. Los ensayes deben realizarse a intervalos entre 25 m y 200 m, dependiendo de las condiciones que presente el pavimento; para cada sección uniforme se recomienda un mínimo de 10 a 20 ensayes. Para concretos asfálticos y hormigones continuamente reforzados, como mínimo, la carga debe ubicarse a lo largo de la huella externa de la pista por evaluar o, alternativamente, a lo largo del eje de las losas continuamente reforzadas. Para hormigones simples con juntas, la carga debe ser ubicada en el centro de la losa y luego movida a la junta más cercana, generalmente al lado de salida. En caminos, calles y autopistas, el ensaye de las juntas se debe llevar a cabo en la huella externa de la pista por evaluar. Generalmente no todas las juntas asociadas a las losas interiores son ensayadas, sin embargo, se recomienda un mínimo de 25 % de cobertura de ensayes. En pavimentos de hormigón en aeropuertos, las mediciones de eficiencia de transferencia de carga en las juntas son realizadas tanto en las juntas transversales como en las longitudinales.
- **Nivel 3.** Este nivel provee un grado detallado de análisis del pavimento, como el que se requiere en estudios específicos de detección de zonas con alta deflexión o detección de huecos bajo los pavimentos de hormigón. Para concretos asfálticos y hormigones continuamente reforzados, los ensayes deben ser realizados a intervalos entre 3 m y 25 m, a lo largo de una o más líneas de ensaye. En caminos, calles y autopistas, los ensayes se realizan en ambas huellas de cada pista. Para hormigones simples con juntas, la carga debe ubicarse en el centro de la losa y luego moverse a la junta o grieta mas cercana, ya sea a lo largo de la huella externa o en la esquina de la losa o a ambas. En pavimentos de hormigón en aeropuertos, las mediciones de eficiencia de transferencia de carga en las juntas se deben ejecutar tanto en las juntas transversales como en las longitudinales.

2.3.2. Especificaciones del Instructivo de Inspección Visual de caminos pavimentados

Del Instructivo de Inspección Visual de caminos pavimentados de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, 2010:

Se extrae la metodología de levantamiento de información para la evaluación de los pavimento, del capítulo "Unidades de Muestreo para Inspección de Caminos Concesionados", se define como unidad estándar de muestreo para los pavimentos de hormigón el área comprendida por las 40 primeras losas de cada kilómetro (ver Figura 2.1).

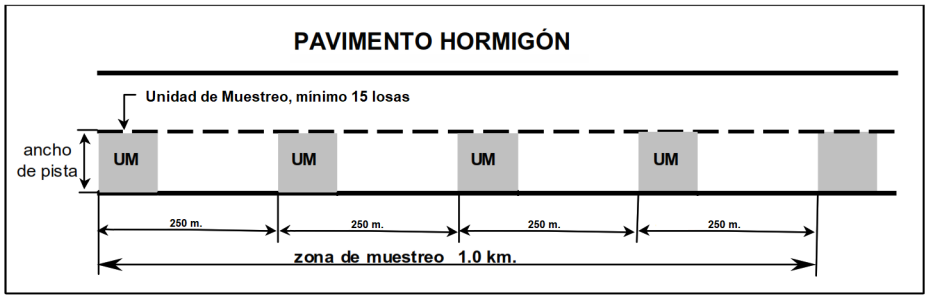


Figura 2.1: *Zona de muestreo para pavimentos de hormigón*

Fuente: Ministerio de Obras Públicas (2010)

2.3.3. Especificaciones de deflectometría en carreteras concesionadas en Chile

De la revisión de las últimas versiones de Bases de Licitación de obras viales concesionadas de los años 2009, 2012, 2015 y 2017, solo en un par de ellas se hace mención a mediciones de deflexión en etapa de explotación:

- Bases de Licitación, Relicitación Concesión Camino Nogales Puchuncaví (Ministerio de Obras Públicas, 2015).
- Bases de Licitación, Concesión Vial Mejoramiento Ruta G-21 (Ministerio de Obras Públicas, 2017).

De esta última se extrae el siguiente párrafo de la sección "2.2.2.3.2 REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE PAVIMENTOS" (Ministerio de Obras Públicas, 2015):

*"**Para el análisis estructural de los pavimentos preexistentes**, la Sociedad Concesionaria podrá emplear métodos no destructivos como el **Falling Weigth Deflectometer** (deflectometría de impacto) (FWD), complementadas con algunas calicatas y la medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), y extracción de testigos para determinar el espesor de las capas estructurales del pavimento al borde del camino. Dichos ensayos deberán tener una antigüedad no mayor a 4 (cuatro) meses a la fecha de presentación al Inspector Fiscal de los proyectos de Ingeniería de Detalle.*

*Las mediciones con deflectómetros de impacto (FWD) se realizarán en conformidad a lo indicado en el numeral 3.603.205(3) del Manual de Carreteras, Volumen N°3, a razón de **10 mediciones por kilómetro y por calzada, alternando y desfasando las mediciones entre una y otra pista**."*

Del artículo 2.4.3.1.1 de las Bases de la Licitación de Concesión Vial Mejoramiento Ruta G-21 (Ministerio de Obras Públicas, 2017), se extrae lo siguiente:

*"la Sociedad Concesionaria, **a partir del quinto año de la Etapa de Explotación**, deberá realizar en forma periódica, **cada 5 (cinco) años, una medición de Deflectometría de Impacto (FWD)** de acuerdo a los procedimientos señalados en el numeral 3.603.205(3) del Manual de Carreteras Volumen 3, que permita evaluar el estado estructural de los pavimentos y determinar si el deterioro que ha sufrido el pavimento corresponde o no al esperado y establecer las eventuales correcciones en el Programa Anual de Conservación, sin perjuicio de las indicaciones que el Inspector Fiscal pueda establecer al respecto.*

*De igual modo, **cuando resten aproximadamente 2 (dos) años para el término de la Concesión**, la Sociedad Concesionaria deberá realizar, una medición de Deflectometría de Impacto (FWD) de acuerdo a los procedimientos señalados en el numeral 3.603.205(3) del Manual de Carreteras, Volumen N°3."*

2.3.4. Especificaciones de deflectometría en carreteras a nivel internacional

2.3.4.1. Australia

Normativa de Referencia:

- Austroads Specification AGAM/S002 – Specification for Pavement Deflection Measurement with a Falling Weight Deflectometer (FWD).
- Austroads Test Method AGAM/T006 – Pavement Deflection Measurement with a Falling Weight Deflectometer.

Se utiliza el dispositivo FWD con el fin de obtener las deflexiones bajo el plato de carga, a 200 y 300 mm desde el centro del punto de aplicación del pulso. Las auscultaciones deben ser realizadas en la pista que se estima es utilizada por la mayoría del tránsito de vehículos pesados por el recorrido de la huella exterior.

La carga aplicada debe ser de 50 kN con un instrumento cuya precisión sea de una cifra decimal. El informe de los datos debe ser a un **intervalo mínimo de 10 m a nivel de proyecto** informando la fecha en día, mes, año y temperatura de la superficie en °C, el tipo de pavimento y espesor de este en mm (Austroads, 2015a).

Los informes deben identificar claramente la pista inspeccionada y la dirección de circulación durante la auscultación, así como la fecha y las condiciones climáticas, y cualquier impedimento a la prospección, o resultados faltantes o no válidos y su causa (por ejemplo, obras viales, maniobras de cambio de pista, obstáculos en el camino, etc.) (Austroads, 2008).

Los datos que deben recopilarse e informarse para cada ubicación de prueba deben incluir lo siguiente (Austroads, 2008):

- Ubicación del punto de auscultación con respecto al sistema de referencia de ubicación especificado por el cliente.
- Nivel de carga objetivo.
- Carga máxima de impacto medida durante el ciclo de carga final.
- Deflexión del pavimento medida por cada uno de los sensores de deflexión durante el ciclo de carga final.
- Deflexiones de pavimento normalizadas para cada uno de los sensores de deflexión correspondientes al ciclo de carga final.
- Temperatura del aire ambiente durante la prueba.
- Temperatura de la superficie del pavimento durante la prueba.

La precisión de los datos informados debe cumplir con los niveles mínimos que se muestran en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1: Precisión de los datos en auscultaciones de Australia

Parámetro	Precisión mínima
Nivel de carga de impacto	1 kPa
Deflexión del sensor	1 µm
Temperatura	1°C

Ubicación de Referencia de puntos del muestreo de deflexión (Austroads, 2008)
Todos los dispositivos de medición de deflexión pueden incorporar un Sistema de Posicionamiento Global Corregido Diferencialmente (DGPS), a menudo denominado receptor GPS que ubica cada punto de prueba topográfica dentro de una distancia con una precisión de ± 2,5 m.

Frecuencia de Medida (Austroads, 2008)
La frecuencia de las auscultaciones de deflexión del pavimento a nivel de red puede verse influenciada por:

- La importancia estratégica de la carretera.
- Niveles observados y tasas de progresión de deterioros en la superficie, como regularidad (IRI), ahuellamiento y grietas.
- La edad del pavimento: por ejemplo, es posible realizar pruebas menos frecuentes durante los primeros años de vida de un pavimento. Sin embargo, otros factores, como el clima adverso y las condiciones del tránsito, las características locales del suelo y el drenaje, las estrategias de mantenimiento y las prácticas de entrega de mantenimiento pueden contrarrestar esto y requerir pruebas más frecuentes.
- La tasa de deterioro de la fuerza después de tener en cuenta las influencias estacionales.
- El volumen de tránsito pesado.
- El dispositivo de medición de deflexión utilizado y el espaciamiento longitudinal entre puntos de prueba por ejemplo, con un espaciado más cercano, pueden ser necesarios levantamientos completos con menos frecuencia.

Un punto de partida sugerido para determinar la frecuencia de las pruebas de deflexión es:

Autopistas y carreteras principales con mucho tránsito (sin deterioros)	:3 - 5 años
Autopistas y carreteras principales con mucho tránsito (con deterioros notables)	:1 - 3 años
Otras carreteras sin deterioros	:5 - 15 años
Otras carreteras con notable deterioro	:2 - 5 años

Metodología de Medición (Austroads, 2008)

Para los pavimentos granulares sellados, las deflexiones del cuenco se miden y generalmente se informan a distancias de 0, 200, 300, 450, 600, 900 y 1500 mm desde el centro de la carga de prueba de impulso. Los valores D_{200} y D_{300} se usan para estimar D_{250} que se usa en la relación D_{250}/D_0 para eliminar los pavimentos de base cementadas de la estimación de la resistencia del pavimento de la red debido a las diferentes características de desempeño de estos pavimentos.

Las deflexiones son deseables tanto como sea posible desde el centro de la carga aplicada y preferiblemente más allá del desplazamiento de 900 mm mencionado anteriormente, debido a que las desviaciones en los desplazamientos grandes aumentan la probabilidad de registrar la extensión completa del cuenco. Los FWD son capaces de medir deflexiones en desplazamientos de hasta 2.400 mm.

Generalmente se llevan a cabo tres “pulsos” en cada punto de prueba, y los datos del tercer “pulso” normalmente se utilizan para fines de informes y análisis. Las deflexiones medidas se normalizan a la carga superficial adecuada, para corresponderse con las presiones operativas de los neumáticos de los vehículos pesados.

2.3.4.2. Canadá

Normativa de Referencia:

- Ministry of Transportation. (2013). Pavement Design and Rehabilitation Manual. Downsview, Ontario, Canadá.

Los dos equipos más comunes para evaluaciones estructurales de pavimento no destructivas son el Dynaflect y el Falling Weight Deflectometer (FWD). Estos dispositivos usan diferentes técnicas para medir la deflexión de la superficie del pavimento ante una carga. El diseñador utiliza estas medidas de deflexión para muchos propósitos además del análisis estructural, incluido el diseño del espesor del pavimento (Ministry of Transportation, 2013).

Al diseñar un pavimento, el grosor de las diversas capas debe determinarse en función de la deflexión máxima deseada o permitida. Las pruebas de deflexión se llevan a cabo idealmente en la primavera cuando la acción de las heladas y las fluctuaciones estacionales de la humedad producen una resistencia mínima del pavimento y deflexiones máximas. Sin embargo, para las pruebas con FWD el procedimiento de prueba podría dañar la estructura de un pavimento débil; por lo tanto, no se recomienda realizar pruebas de FWD en la primavera (Ministry of Transportation, 2013).

Las especificaciones de equipos FWD, incluidos los requisitos mínimos de calibración que debe contar y cumplir son las descritas a continuación (Chan and Lane, 2005):

- Pulso de carga con una carga máxima objetivo de 75 +/- 5 kN.
- Placa de carga con una almohadilla de goma de al menos 5 mm de espesor pegada al fondo para permitir la aplicación de una carga uniforme sobre la superficie del pavimento. Las almohadillas de goma deben cumplir con los requisitos de las especificaciones del fabricante del equipo.
- Un mínimo de siete sensores de deflexión con distancias radial lineal desde 0 a 180 cm.
- Célula de carga con una resolución de lectura de 0.1 kN o mejor.
- Termómetro con una resolución de lectura de 0.5 °C o mejor.

Metodología e intervalo de medición

Es posible diferenciar distintos escenarios de recolección de datos (Chan and Lane, 2005), cuyos protocolos de auscultación con FWD deben ser ajustados dependiendo del uso de estos, en consecuencia se definen tres tipos de escenarios de recopilación de datos, utilizándose protocolos de prueba adecuados para cada uno:

- Nivel de red:
  - Normalmente se realiza a intervalos de 200 a 500 m.

- Se recomienda un mínimo de 7 puntos de prueba por sección de pavimento uniforme para asegurar una muestra estadísticamente significativa.
- Mínimo de 1 pulso de carga en cada nivel de carga.
- Al menos el 10 % de las losas deben evaluarse en las juntas para pavimento de concreto simple (JPC).

- Nivel general de proyecto:
  - Típicamente realizado a intervalos de 50 m a 200 m.
  - Se recomienda un mínimo de 15 puntos de prueba por sección de pavimento uniforme.
  - Mínimo de 1 pulso de carga en cada nivel de carga.
  - Cobertura mínima del 25 % de las juntas para el pavimento de concreto simple (JPC).

- Nivel de proyecto detallado:
  - Normalmente se realiza a intervalos de 10 a 50 m.
  - Mínimo de 20 puntos de prueba recomendados por sección de pavimento uniforme.
  - Se recomienda un mínimo de 1 a 2 caídas de carga en cada nivel de carga.
  - Cobertura mínima del 50 % de las juntas para el pavimento de concreto simple (JPC).

La metodología utilizada para el análisis de datos (Ministry of Transportation, 2013) es un proceso estadístico que estima deflexiones máximas con el objeto de reducir el efecto de la variación estacional y de la sección a lo largo de la longitud del pavimento.

Se divide el pavimento en secciones de 300 m de largo, aunque pueden ser de longitud variable siempre que sean secciones homogéneas con respecto a los factores que influyen en el diseño del pavimento como el tránsito o la subrasante, por ejemplo.

Se seleccionan al menos 10 puntos de muestreo dentro de cada sección usando una tabla de números aleatorios, o más de 10 puntos equidistantes entre sí. Se obtiene la medida de deflexión en los puntos seleccionados. Calcular el valor estimado de deflexión máxima probable usando la ecuación:

$$D_{max} = (\overline{X} + 2\sigma_x) \tag{2.3.1}$$

Donde:

D_{max} : Deflexión característica, con una confiabilidad del 97,5 %.
$\overline{X}$: Deflexión media.
σ_x : Desviación estándar.

2.3.4.3. Colombia

Normativa de Referencia:

- Ministerio de Transporte. (2008). Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Transporte. (2007). E-798-07 - Método para medir deflexiones mediante el deflectómetro de impacto (FWD). Colombia.

Dentro del plan de evaluación de la condición global del pavimento, existen parámetros basados en el cuenco de deflexión a partir de las medidas con el FWD que brindan información sobre la condición estructural del pavimento, presentes en la Tabla 2.2. Ellos se basan en los siguientes principios (Ministerio de Transporte, 2008):

- La deflexión bajo el centro de aplicación de la carga representa la deflexión de toda la estructura del pavimento.
- La pendiente o las diferencias de deflexión cerca del punto de aplicación de la carga reflejan la rigidez relativa en la parte superior de la estructura del pavimento.
- La pendiente o las diferencias de deflexión en la parte media del cuenco de deflexión (entre unos 300 y 900 mm del punto de aplicación de la carga) reflejan la rigidez relativa de la capa de base o de las capas inferiores de la sección de pavimento.
- Las deflexiones medidas hacia el extremo del cuenco reflejan bastante bien la condición de la subrasante.

Tabla 2.2: Parámetros del cuenco de deflexión utilizados en Colombia

Parámetro	Fórmula	Indicador
Área	$A = \frac{6(D_0 - 2D_{300} - 2D_{600} - D_{900})}{D_0}$	Rigidez relativa entre el pavimento y su soporte
Índice de curvatura superficial	$ICS = D_0 - D_{300}$	Junto con otros parámetros, da una idea de la rigidez de las capas asfálticas
Índice de daño de la base	$IDB = D_{300} - D_{600}$	Deformación compresiva sobre la base granular
Índice de curvatura de la base	$ICB = D_{600} - D_{900}$	Deformación compresiva sobre la subrasante

Normalmente, se recomienda que la fuerza aplicada al pavimento sea de 40 kN, de manera que las predicciones de los módulos de las capas del pavimento sean representativas de la respuesta del pavimento bajo las cargas de las ruedas de los vehículos pesados que circulan por las carreteras. Los desplazamientos verticales producidos en el pavimento a causa del impacto son detectados por geófonos situados en línea recta a determinadas separaciones del centro de aplicación de la carga, típicamente (pero no obligatoriamente) 0, 300, 600, 900, 1200, 1500 y 1800 mm.

Metodología e intervalo de medición (Ministerio de Transporte, 2007)
La magnitud de la carga por aplicar es función del tipo de ensayo, pero normalmente en cada uno se suelen aplicar tres niveles de carga dinámica, los que están asociados a las características del pavimento. El encargado de proyecto será quien determine los niveles de carga a utilizar. Si no se indica de otra forma, se utilizará 50 kN.

Los lugares y el número de ensayos dependerán del nivel de muestreo seleccionado, estos se basan según 8.502.5 MC-V8 Auscultaciones y prospecciones: Métodos para medir deflexiones mediante el deflectómetro de impacto (FWD) antes descrito del Manual de Carreteras del MOP, Chile.

Interpretación de la información
Valores máximo, mínimo y rangos de valores del parámetro "Área" para diferentes condiciones generales del pavimento (Ministerio de Transporte, 2008), se presentan en las Tablas 2.3 y 2.4:

Tabla 2.3: Valores mínimos y máximos del parámetro área del cuenco de deflexión utilizado en Colombia

Parámetro	Umbral	Indicador
Área	$A_{máx}$ = 36	Pavimento extremadamente rígido (valor teórico)
	$A_{mín}$ = 11,1	Pavimento con misma rigidez que la subrasante

Tabla 2.4: Rangos del parámetro AREA según la estructura del pavimento para Colombia

Estructura	Área
Pavimento con capas asfálticas gruesas (100 mm o más)	21 – 30
Pavimento con capas asfálticas delgadas (menos de 100 mm)	16 – 21
Pavimento con tratamiento superficial	15 – 17
Pavimento débil con tratamiento superficial	12 - 15

Rangos de valores de otros parámetros para diferentes condiciones generales del pavimento (Ministerio de Transporte, 2008):

Tabla 2.5: Valores para IDB e ICB para condiciones del pavimento en Colombia

Parámetro	Valor	Indicador
IDB	IDB > 0,150 [mm]	Comportamiento deficiente de la base granular
ICB	ICB > 0,080 [mm]	Comportamiento deficiente de la subrasante

2.3.4.4. España

Normativa de Referencia:

- Ministerio de Fomento. (2007). Norma NLT 338/07 Medida de deflexiones en firmes y pavimentos con deflectómetro de impacto. España.
- Ministerio de Fomento. (2003). Norma 6.3 IC: "Rehabilitación de firmes, de la instrucción de carreteras". Madrid, España.

Según la normativa NLT-338/07 "Medida de deflexiones en firmes y pavimentos con deflectómetro de impacto", este ensayo permite determinar la deflexión vertical puntual d_c y el radio de curvatura del cuenco de deflexiones R_c de una superficie, inducidos por una fuerza de impacto generada por una masa que cae sobre un sistema de muelles y es transmitida a la superficie de medición por medio de una placa, equivalente a una carga de **63,77 kN** (6,5t), utilizando para ello varios sensores en la placa. Con el objeto que sea razonablemente representativa la capacidad estructural del firme o pavimento auscultado, la medición debe efectuarse en **intervalos iguales o inferiores a 20 m**.

El equipo de medida se puede emplear en cualquier tipo de carretera, sin existir restricciones geométricas de trazado longitudinal o transversal para su utilización. Sin embargo, el hecho de que deba permanecer estático durante la realización del ensayo hace que sea necesario adoptar precauciones especiales en carreteras de alta intensidad de tráfico y la seguridad de la circulación vial.

Su utilización se debe limitar a un rango de temperaturas del pavimento entre 5 y 30 °C o 40°C cuando tenga un espesor de mezclas bituminosas inferior a 10 cm o esté muy fisurado. Las medidas de deflexión se deben realizar en la época de máxima humedad de la explanada. En caso contrario éstas se tienen que corregir en base a estudios específicos. En todo caso, hay que prescindir medidas tomadas con la explanada helada o en época climática muy seca.

La normativa NLT-338/07 contempla el empleo del ensayo sobre cualquiera de las capas del pavimento, con carga y presión fijas. Para el estudio de la evaluación del apoyo de losas en pavimentos de hormigón se deben aplicar, como mínimo, las tres siguientes cargas: 68,67kN (7T); 98,10 kN (10T) y 127,53 kN (13T).

Los sensores se sitúan a distancias entre 0 y 1500 mm del centro de la carga, pudiendo llegar a los 2500 mm si fuera necesario. La distancia entre sensores se determina en función del número de capas del firme y de los espesores de las mismas, generalmente a **0, 300, 600 y 900 mm** del centro de la placa de carga.

El equipo debe contar con un sistema de señalización, además se debe adoptar todas las medidas necesarias para garantizar el cumplimiento de la normativa en prevención de riesgos laborales y de seguridad de la circulación de los restantes usuarios de la carretera. Además, cuenta con un procesador de datos y sistema de almacenamiento. Se sugiere conveniente instalar un sistema para

el posicionamiento del equipo, GPS o similar, con el fin de registrar las coordenadas UTM en cada medida realizada. También se aconseja contar con un dispositivo que permita capturar y almacenar imágenes de la carretera en cada punto ensayado.

Metodología e intervalo de medición (Ministerio de Fomento, 2007)

Se tomarán como medidas los valores puntuales de las deflexiones en centésimas de mm tomados **al menos cada 20 m**. Se considerarán para valores puntuales las deflexiones **corregidas por humedad y temperatura**, según indique la normativa o recomendaciones vigentes. Se consideran tramos homogéneos los así definidos en la normativa vigente. Para los tramos homogéneos se considerará el valor de la **deflexión característica** de cálculo que será el especificado en la normativa vigente. En calzadas con más de un carril se considerará el carril por donde circulen habitualmente los vehículos pesados, si es que están diferenciados claramente. En caso contrario será necesario medir todos los carriles. Si se mide más de una rodada por carril se considerará la peor situación, es decir, los valores de deflexión característica de cálculo más elevados.

Frecuencia de medida (Ministerio de Fomento, 2007)

La frecuencia de medida corresponde cada 2 años o cuando aparezcan deterioros.

Interpretación de la información (Ministerio de Fomento, 2003)

Se considerará que el firme tiene una vida residual insuficiente siempre que el valor de la deflexión patrón en un punto determinado supere los umbrales indicados en las Tablas 2.6 y 2.7, salvo que un estudio y análisis más específico del estado de cada tramo homogéneo justifiquen la asignación de valores distintos para dichos umbrales.

$$D_k = (D_m + 2d_s) \tag{2.3.2}$$

Donde:

D_k : Deflexión característica, con una confiabilidad del 97,5 % en mm
D_m : Deflexión media en mm
d_s : Desviación estándar

Tabla 2.6: Adaptado de Umbrales del valor puntual de la deflexión

Categoría de Tráfico Pesado					
T00 [mm]	T0 [mm]	T1 [mm]	T2 [mm]	T3 [mm]	T4 [mm]
Umbral del valor puntual para Firmes Flexibles y Semiflexibles (10^{-2} mm)					
0,5	0,5	0,75	1	1,25	1,5 (*) 2 (**)
Umbral del valor puntual para Firmes Semirrígidos (10^{-2} mm)					
0,35	0,4	0,4	0,5	0,5	0,8

(*) Firmes con espesor de pavimento bituminoso ≥ 5cm
(**) Firmes con espesor de pavimento bituminoso < 5cm

Tabla 2.7: Adaptado de Umbrales para valores característicos

Categoría de Tráfico Pesado					
T00 [mm]	T0 [mm]	T1 [mm]	T2 [mm]	T3 [mm]	T4 [mm]
Umbral del valor característico para Firmes Flexibles y Semiflexibles (10^{-2} mm)					
5	7	8	10	11	13
Umbral del valor característico para Firmes Semirígidos (10^{-2} mm)					
4	5	6	8	8	10

Cuyas categorías de tráfico se definen según indica la siguiente tabla (Ministerio de Fomento, 2003):

Tabla 2.8: Categorías de tráfico pesado de España

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T00	T0	T1	T2	T3	T4
IMDp (vehículos pesados/día)	≥ 4 000	< 4 000	< 2 000	< 800	< 200	< 50
		≥ 2,000	≥ 800	≥ 200	≥ 50	

2.3.4.5. México

Normativa de Referencia:

- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2017). Manual M-MMP-4-07-020 Determinación de las Deflexiones con Equipo de Impacto. Ciudad de México, México.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2017). Norma N-CSV-CAR.1-03-010/17 Determinación de las Deflexiones de un Pavimento. Ciudad de México, México.

Exigencias en contratos especifican que las mediciones serán directas con un deflectómetro de impacto tipo FWD (Falling Weight Deflectometer) o HWD (Highway Weight Deflectometer), dicha medición se realizará cada 100 m y en todas las pistas de circulación y sentido. Se considerará el promedio de los puntos medidos por kilómetro pista. Los equipos de medición deberán de estar calibrados por el fabricante y certificados por el IMT y, en su caso, por el Centro Nacional de Metrología. La vigencia de la verificación emitida por el IMT deberá ser menor a un año (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2018).

Los valores de deflexión deben ser normalizados para una temperatura de 20°C y un esfuerzo aplicado de 700 kPa (50 kN) (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2017a).

Frecuencia de Medida (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2018)
La medición se deberá realizar en el mes de diciembre de cada año calendario y posterior a cualquier acción correctiva. En caso de incumplimiento con la frecuencia de inspección, se aplicarán las Penas Convencionales establecidas en el Contrato.

Intervalo de medición (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2017b)
Los valores del intervalo de medición se definirán como mínimo de 100 m y máximo 500 m y se establecerán en los Términos de Referencia. Para proyectos especiales podrán definirse intervalos de medición más cortos.

Metodología de Evaluación (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2017b)
Las mediciones se llevan a cabo con el propósito de determinar las deflexiones existentes en tramos en operación. En estos trabajos se utilizan equipos de alto rendimiento. La condición estructural de los segmentos carreteros se determinará en función de la deflexión normalizada utilizando los rangos que se indican en la Tabla 2.9

Esta evaluación será aceptada y considerada terminada si se verifica lo siguiente:

- El tipo de equipo utilizado sea el estipulado según la naturaleza de los trabajos.

- Acreditación de la vigencia de calibración y verificación del equipo.
- Delimitación de los tramos de acuerdo con los criterios establecidos.
- Presentación de todas y cada una de las secciones y anexos del informe del servicio prestado.

Tabla 2.9: Rangos de valores representativos de deflexiones para la clasificación de los segmentos carreteros a 700 Kilopascales y 20 grados Celsius en concesiones de México

Rangos de valores representativos de deflexiones [mm]		
Condición Estructural	**Autopistas y Corredores Carreteros**	**Red Básica y Secundaria**
Buena	0 a 0,4	0 a 0,5
Regular	---	> 0,5 y ≤ 0,8
Mala	> 0,4	> 0,8

Para el programa de rehabilitación y conservación de carreteras se exige el cumplimiento del estándar de desempeño. Las bases de los concursos públicos establecen requerimientos de deflexión como las de la Tabla 2.10 (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2018):

Tabla 2.10: Deflexiones de modelo de contrato de prestación de servicios para conservación de carretera en México

Valores Máximos	Tiempo Máximo de Respuesta Correctiva
Def: <= a 500 µm por kilómetro carril	30 días naturales

2.3.4.6. Perú

Normativa de Referencia:

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). Manual de Carreteras "Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013". Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). Manual de Ensayo de Materiales MTC-E-1002 Medida de deflexión de un pavimento flexible empleando la Viga Benkelman. Lima, Perú.

Los procedimientos para la aceptación de recepción de pavimentos de concreto asfáltico en caliente, consisten en efectuar mediciones de deflexión **cada 50 m de forma alternada por pista**. Podrá emplearse la **viga Benkelman**, el **FWD**, o cualquier otro método debidamente aprobado por el Supervisor.

La medición de deflexiones sobre la carpeta asfáltica terminada tiene como finalidad la evaluación, diagnóstico y complementación de los diferentes controles que deben realizarse a la carpeta asfáltica. La medición de deflexiones sobre la carpeta asfáltica terminada, se efectuará al finalizar la obra como control final de calidad del pavimento terminado y para efectos de recepción de la obra. Es de cumplimiento obligatorio por parte del Contratista.

Para el caso de la Viga Benkelman el Contratista proveerá un volquete (camión cuya caja puede levantarse mediante un sistema hidráulico para volcar su contenido) operado con las siguientes características (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016b):

- Clasificación del vehículo: C2 (vehículos construidos principalmente para el transporte de pasajeros sentados y también diseñados para permitir el transporte de pasajeros de pie en el pasadizo).
- Peso con carga en el eje posterior: 82 kN (8.200 kg)
- Llantas del eje posterior: dimensión 10x20, 12 lonas. Presión de inflado: 0,56 MPa o 80 psi. Excelente estado.

Ubicación de Referencia de puntos del muestreo de deflexión (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013a)
Los puntos de medición estarán referenciados con el estacado del proyecto, de tal manera que exista una coincidencia con la relación a las mediciones que se hayan efectuado a nivel de subrasante.

Frecuencia de Medida (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013a)
Evaluación deflectométrica antes de la recepción de la obra.

Metodología de Evaluación (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013b)
Se analiza la deformada o curvatura de la deflexión obtenida de por lo menos 3 valores por punto, con lo cual se obtienen indirectamente los módulos de elasticidad de la capa asfáltica. Se obtiene la deflexión característica obtenida por sectores homogéneos que se comparará con la deflexión admisible para el número de repeticiones de ejes equivalente de diseño.

Las deflexiones se comparan con el valor límite admisible, que es la deflexión tolerable que garantiza un comportamiento satisfactorio del pavimento en relación con el tránsito que debe soportar (Consorcio de Rehabilitación Vial, 1982):

$$D_c = (D_m + 1,645 d_s) \tag{2.3.3}$$

$$D_{adm} = (\frac{1,15}{N})^{0,25} \tag{2.3.4}$$

Donde:

D_c : Deflexión característica, con una confiabilidad de 95 % en mm para autopistas.
D_m : Deflexión media en mm.
d_s : Desviación estándar.
d_{adm} : Deflexión admisible en mm (a comparar con deflexiones viga Benkelman).
N : Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 ton acumulados en millones.

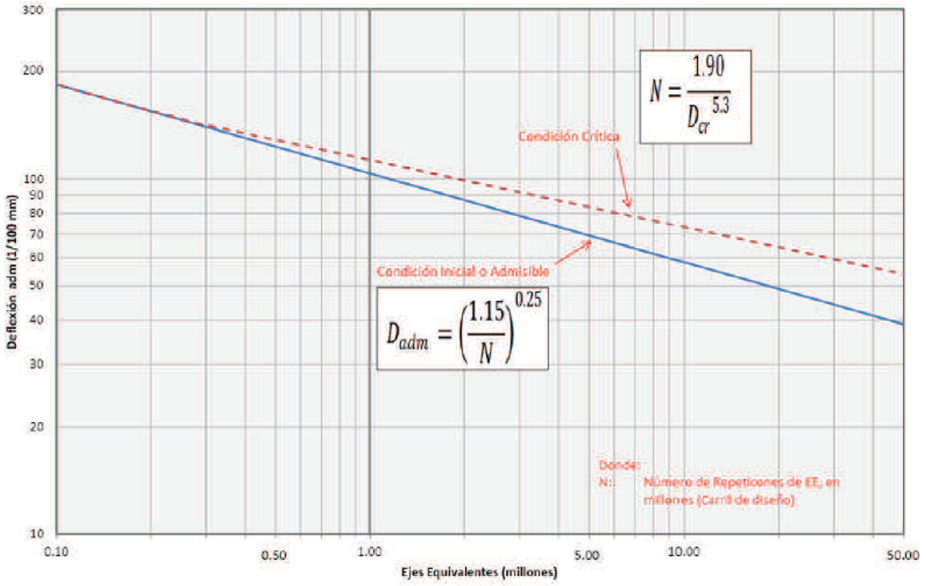


Figura 2.2: *Gráfico de deflexiones admisibles y críticas en proyectos peruanos.*

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013b)

Las deflexiones características y admisibles se comparan mediante un análisis combinado de los resultados de la evaluación, para establecer la capacidad estructural del pavimento existente en relación al tránsito y cargas circulantes.

Con el propósito de asegurar el diseño, en base a las metodologías del T.R.R.L. y Ontario, se definió una deflexión crítica: condición del pavimento al término del período de servicio (Consorcio de Rehabilitación Vial, 1982):

$$N = \frac{1,9}{D_{cr}^{5,3}} \tag{2.3.5}$$

2.3.4.7. Sudáfrica

Normativa de Referencia:

- South African National Roads Agency SOC Ltd. (2014). South African Pavement Engineering Manual Chapter 10 Pavement Desing.
- South African National Roads Agency SOC Ltd. (2014). South African Pavement Engineering Manual Chapter 6 Road Prism and Pavement Investigations.

La literatura recopilada es mayormente de análisis de datos a nivel de red, el cual tiene como objetivo monitorear el desempeño general de una red, destacar y priorizar las secciones para mantenimiento o rehabilitación recopilando información suficiente para evaluar el estado del pavimento y decidir sobre medidas de mantenimiento y rehabilitación apropiadas. La recopilación y el análisis de datos a nivel de proyecto suelen ser mucho más detallados que el análisis de nivel de red.

Para el monitoreo de **nivel de red**, la South African National Roads Agency Soc. LTD. (SANRAL) mide deflexiones FWD a **intervalos de 200 metros**. Para investigaciones a nivel de **proyecto**, se recomiendan deflexiones FWD **al menos cada 100 metros** (South African National Roads Agency SOC Ltd., 2014a).

Intervalos de medición (Department of Transport Republic of Souh Africa, 1997)
Las longitudes de intervalos de medición para distintos tipos de carreteras se resumen en la Tabla 2.11:

Tabla 2.11: Adaptación Tabla 14 de TRH12 - Longitud de evaluación para carreteras de Sudáfrica

Clasificación de la Carretera	Longitud de secciones de evaluación básicas para el uso durante la investigación a nivel de proyecto
Autopista principal interurbana	50 m a 100 m
Autopista rural (carretera de categoría A)	100 m a 200 m
Carretera rural principal (carretera de Categoría B)	100 m a 400 m
Carretera rural terciaria (carretera de categoría C y D)	100 m a 1000 m
Carretera principal urbana	50 m a 100 m
Colector	50 m a 200 m
Carreteras residenciales	50 m a 400 m

Metodología de Medición (South African National Roads Agency SOC Ltd., 2014a)
El cuenco de deflexiones se mide cuando se deja caer un peso de **40 kN** a una altura estándar sobre una placa de carga con amortiguadores de goma con un FWD automatizado. La placa de carga FWD tiene un diámetro de 300 mm. En Sudáfrica, los geófonos del FWD típicos se configuran para medir la deflexión debajo del centro de la placa de carga, **200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 y 1800 mm**. El peso de 40kN representa la mitad de una carga de eje estándar de 80kN de un camión (Horak et al., 2015).

El tamaño y la forma de los cuencos de deflexión varían y dependen de la estructura del pavimento, la resistencia y la rigidez de los materiales, el equilibrio del pavimento, la temperatura y, por supuesto, la magnitud de carga, la duración y el área de contacto. Para **pavimentos flexibles en buenas condiciones, la deflexión máxima es típicamente menor de 500 micrones** bajo una carga de eje estándar.

En pavimentos de hormigón, la filosofía de diseño es garantizar la transferencia de carga adecuada en la junta/grieta bajo carga de tráfico en movimiento. Esta capacidad para transferir cargas a través de la junta/grieta se puede definir en términos del movimiento vertical relativo a medida que la carga se mueve a través de la junta/grieta.

Interpretación de la información
El cuenco de deflexión puede usarse para identificar áreas débiles en la profundidad de una estructura de pavimento y sobre la longitud de una sección uniforme, sin un conocimiento detallado de la estructura del pavimento, utilizando parámetros como el índice de capa base (BLI), índice de capa intermedia (MLI) e índice de capa inferior (LLI).

Los criterios de clasificación de condición han sido desarrollados para varios parámetros del cuenco de deflexión. Se encuentran disponibles criterios límites, que relacionan el número acumulado de ejes equivalentes “E80” con un número de parámetros del cuenco de deflexión. Los criterios dados en TRH12 (Department of Transport Republic of Souh Africa, 1997) se muestran en la Tabla 2.12. Se dan los criterios para diferentes estados de comportamiento, incluyendo una estimación de vida remanente para pavimentos con parámetros del cuenco de deflexión dentro de esos rangos. Estas correlaciones con la vida remanente se deben usar con sumo cuidado, ya que pueden conducir a una simplificación excesiva e imprecisiones (South African National Roads Agency SOC Ltd., 2014b).

Los cuatro niveles de estados de comportamiento de la Tabla 2.12 se convierte en un sistema de tres niveles al omitir los pavimentos muy rígidos y se tiene una tabla para un análisis de rehabilitación de pavimentos. Horak sugirió estos criterios en términos de “bueno”, “advertencia” y “severo” mostrados en la Tabla 2.13 para identificar las deficiencias en capas estructurales al evaluar una carretera (Horak, 2008).

En pavimentos de hormigón, el movimiento vertical relativo a través de la junta/grieta puede medirse moviendo una carga real de una rueda a través de la junta/grieta o usando el FWD, que mide

Tabla 2.12: Adaptación de tabla 12 del SAPEM Capítulo 6 - Estados de comportamiento del pavimento utilizado en Sudáfrica

Estado de Comportamiento	Rango Tráfico MESA	D_0 [mm]	BLI [mm]	MLI [mm]	LLI [mm]
Pavimento de Base Granular					
Muy Rígido	10 - 100 (12 - 50)	<0,3	<0,08	<0,05	<0,04
Rígido	3 - 10 (3 - 8)	0,3-0,5	0,08-0,25	0,05-0,15	0,04-0,08
Flexible	1 - 3 (0,8 - 3)	0,5-0,75	0,25-0,5	0,15-0,2	0,08-0,1
Muy Flexible	0,003 - 1 (<0,8)	>0,75	>0,5	>0,2	>0,1
Pavimento de Base Asfáltica					
Muy Rígido	10 - 100	<0,25	<0,05	<0,03	<0,03
Rígido	3 - 10	0,25-0,4	0,05-0,20	0,03-0,1	0,03-0,05
Flexible	1 - 3	0,4-0,6	0,20-0,4	0,1-0,15	0,05-0,08
Muy Flexible	0,003 - 1	>0,6	>0,4	>0,15	>0,08
Pavimento de Base Cementada					
Muy Rígido	10 - 100	<0,15	<0,04	<0,03	<0,03
Rígido	3 - 10	0,15-0,25	0,04-0,10	0,03-0,06	0,03-0,05
Flexible	1 - 3	0,25-0,4	0,10-0,3	0,06-0,1	0,05-0,08
Muy Flexible	0,003 - 1	>0,4	>0,3	>0,1	>0,08
Pavimento de Base de Concreto					
Muy Rígido	10 - 100	<0,1	-	-	-
Rígido	3 - 10	0,1-0,2	-	-	-
Flexible	1 - 3	0,2-0,3	-	-	-
Muy Flexible	0,003 - 1	>0,3	-	-	-

*Valor entre paréntesis sugerido por Horak (2008).

Tabla 2.13: Criterios de condición estructural para parámetros del cuenco de deflexión para varios tipos de pavimentos

	Structural condition rating	Deflection bowl parameters				
		D_0 (µm)	RoC (m)	BLI (µm)	MLI (µm)	LLI (µm)
Granular base	Sound	<500	>100	<200	<100	<50
	Warning	500–750	50–100	200–400	100–200	50–100
	Severe	>750	<50	>400	>200	>100
Cementitious base	Sound	<200	>150	<100	<50	<40
	Warning	200–400	80–150	100–300	50–100	40–80
	Severe	>400	<80	>300	>100	>80
Bituminous base	Sound	<400	>250	<200	<100	<50
	Warning	400–600	100–250	200–400	100–150	50–80
	Severe	>600	<100	>400	>150	>80

la diferencia de deflexión entre la losa cargada y la losa contigua (el otro lado de la junta/grieta). Las pautas en la Tabla 2.14 pueden usarse para juzgar la severidad del movimiento vertical relativo bajo una carga de 40 kN de una rueda (South African National Roads Agency SOC Ltd., 2014b).

Tabla 2.14: Mediciones de deflexión en juntas y grietas en pavimentos de hormigón

Relative Vertical Movement	Severity
<0.1 mm	Minor
0.1 to 0.2 mm	Warning
> 0.2 mm	Severe

2.3.5. Estudios para valores de deflexiones en carreteras

Se realiza un levantamiento de información de la cual es posible distinguir tres maneras de caracterizar la deflexión ya sea a través de evaluaciones de valores puntuales, promedio o característicos. Cada una de ellas posee una escala diferente asociada principalmente al tipo de pavimento o al tipo de tránsito de diseño, este último se refleja en el peso asociado a la medición según el valor del eje equivalente estándar de diseño.

2.3.5.1. Estudios Internacionales para Pavimentos Flexibles

Consorcio de Rehabilitación Vial, Perú

Estudios como el presentado en la sección 2.3.4.6 (Figura 2.2) dan una idea de comportamiento del pavimento asociado a la estructura de este, tanto por el tipo de material o espesor de las capas, como al número de ejes equivalentes de diseño para el cual fue pensado. Esta metodología es de particular interés ya que en base a los pavimentos tipo, presentados en el Manual de Carreteras "Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013" del Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, es posible verificar que poseen estructuras semejantes a los pavimentos chilenos (más en comparación a estructuras españolas o sudafricanas).

Se verifica una clara correspondencia entre deflexión y condición del pavimento; esta comprobación es fundamental para la metodología de evaluación empleada, al verificarse que la deflexión constituye un adecuado indicador de comportamiento en los pavimentos del Perú.

Horak & Emery, Falling weight deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavement structural evaluations, 2006, Sudáfrica

Otra escala de valores de deflexión, utilizada y mencionada en las Secciones 2.3.4.7 y 2.3.4.4 proviene de estudios sudafricanos, cuyos valores están definidos para pavimentos de base granular, bituminosa y cementada, a cada tipo de estructura se le determinó la vida remanente y se correlacionó con los parámetros del cuenco de deflexión y la vida restante expresada en términos de repeticiones de eje estándar equivalente de 80 kN, tal como se aprecia en la Figura 2.3.

Los pavimentos fueron medidos con el FWD y su análisis proporciona una mejor comprensión de ellos. Los parámetros del cuenco de deflexión permiten observar la contribución al desempeño de cada capa del pavimento.

Los resultados de esta investigación fueron incluidos en el manual TRH12 para el análisis y diseño de rehabilitación de carreteras en Sudáfrica.

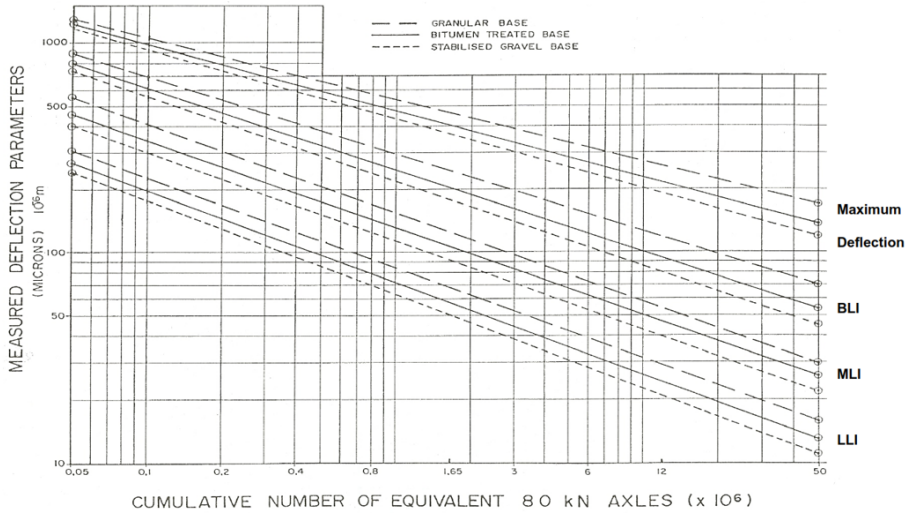


Figura 2.3: *Correlación entre parámetros del cuenco de deflexión y vida remanente.*

Fuente: Horak and Emery (2006)

Los parámetros del cuenco de deflexión BLI, MLI y LLI permiten aplicar una clasificación de condición estructural de tres niveles como un primer paso en el análisis de los datos obtenidos de un FWD.

Zárate Aquino, Lucero Arellano, & Zárate Orozco, Aspectos Importantes derivados de la utilización del deflectómetro de impacto HWD, aplicados para la rehabilitación o reconstrucción de los pavimentos flexibles, 2010, México.

Este estudio realizado en México entrega relaciones entre distintos indicadores, caracterizando aquellos valores de los que se espera una buena condición para las estructuras de pavimentos de ese país.

En la Figura 2.4, se observa la correlación entre el Índice de Curvatura Superficial – Deflexión Máxima, la cual muestra una tendencia que se relaciona con el ángulo que se forma entre poblaciones de este parámetro con el eje de las abscisas. Se determina que el rango óptimo se encuentra entre el valor cero y 150 µm, para deflexiones máximas de 300 µm.

Además, se observa que los valores que cumplen la condición de óptimo corresponden a las manchas que forman un ángulo de 25° con respecto al eje de las abscisas, valores de ángulo superiores indican debilidad del pavimento, e inclusive de la subrasante.

Una correlación entre la Relación de Deflexión – Deflexión Máxima, presenta un comportamiento según lo mostrado en la Figura 2.5, se observa que para deflexiones máximas de 300 µm la relación debe encontrarse entre 0,7 y 1,0; para el caso de pavimentos resistentes, en general el parámetro debe

tender al valor de 1,0.

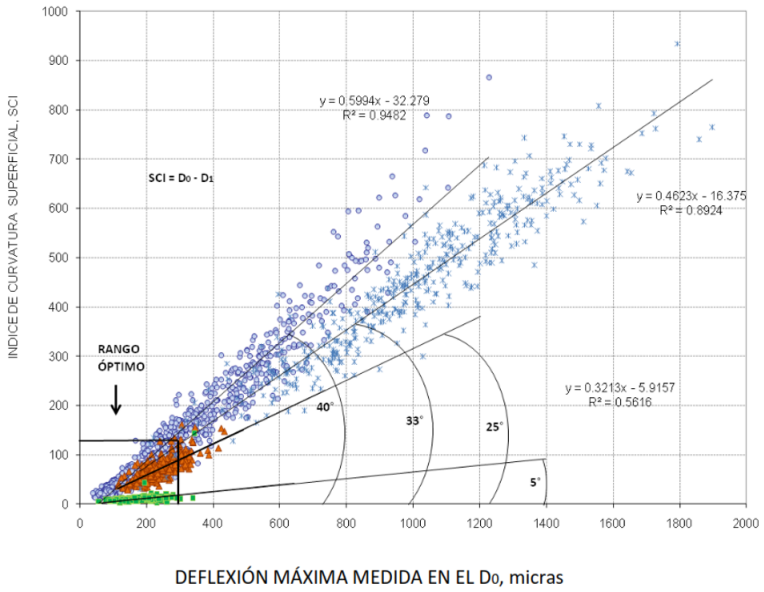


Figura 2.4: *Relación Índice de curvatura superficial – Deflexión Máxima.*

Fuente: Zárate Aquino et al. (2010)

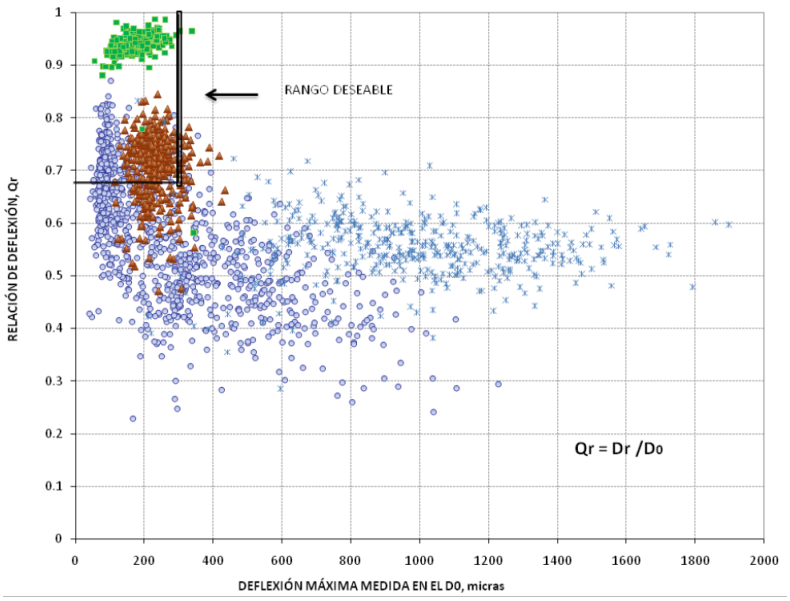


Figura 2.5: *Relación de Deflexión – Deflexión Máxima.*

Fuente: Zárate Aquino et al. (2010)

2.3.5.2. Estudios Nacionales para Pavimentos Rígidos

Calibración del modelo de agrietamiento para pavimentos de hormigón simple implementado en el sistema GIMPh. - Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1998.

En este estudio se analizó la transferencia de carga de las distintas Zonas Testigo calculando un valor promedio por estación del año y por ubicación geográfica.

El valor de transferencia de carga de un pavimento no es constante, puesto que estará afectado por las condiciones térmicas y además tomará un valor diferente dependiendo si es evaluada en la losa de aproximación o de alejamiento. En efecto, estudios realizados por el IDIEM demostraron que los ciclos de variación de las temperaturas medias en el espesor de la losa producen contracciones y elongaciones longitudinales que hacen variar la abertura de las juntas transversales desde una abertura extrema, en que el pavimento se comporta como un conjunto de losas relativamente aisladas, hasta una situación de completo bloqueo de juntas en días soleados muy calurosos, en que el pavimento se comporta como una cinta continua, lo anterior explicaría los cambios horarios de la transferencia de carga en las losas.

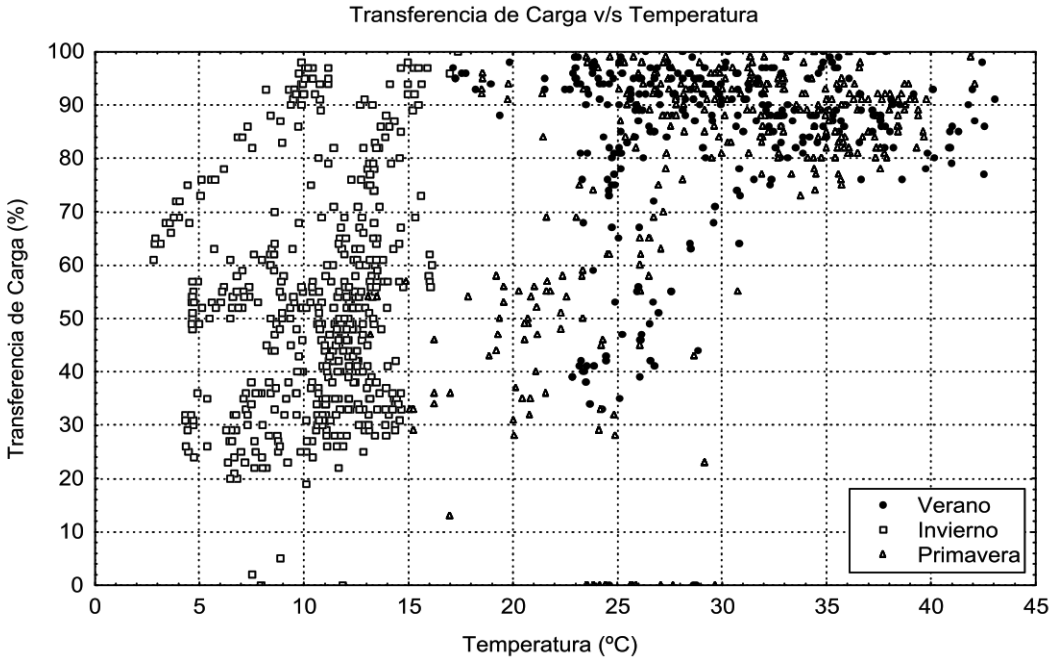


Figura 2.6: *Transferencia de carga en función de la temperatura media de la losa según la época del año.*

Fuente: Cabrera (1998)

En la Figura 2.6 se observa la transferencia de carga en función de la temperatura media de la losa según la estación del año (verano, invierno y primavera). En verano y primavera cuando se alcanzan las mayores temperaturas la transferencia de carga es alta entre 80 y 100 %. Se puede apreciar que sobre los 25°C la transferencia de carga es prácticamente constante con un promedio de 90 %. Bajo los 25°C la transferencia de carga promedio disminuye aproximadamente a un 50 %, aunque también se observan valores altos en invierno (de 5° a 15°C) cercanos al 100 %.

Realizando una división geográfica en dos grandes zonas: centro y sur, debido a que se observó una tendencia de las Zonas Testigo ubicadas al sur del país al presentar una mayor transferencia de carga en invierno que aquellas ubicadas en el centro. En verano y primavera la transferencia de carga es similar independiente de la zona geográfica. Sin embargo, en invierno se observa que para la zona sur la transferencia de carga es relativamente más alta que la zona centro.

Lo anterior se debería a que los pavimentos de la zona sur, hormigonados principalmente en condiciones ambientales frías y de baja evaporación, presentan una menor temperatura de boqueo de juntas transversales, lo que los hace relativamente insensibles al clima de invierno, tendiendo a permanecer más cerradas sus juntas y consecuentemente con una alta transferencia de carga. Además, el mayor nivel de precipitaciones en invierno en la zona sur, incorpora humedad al hormigón del pavimento produciendo un hinchamiento que se manifiesta en juntas transversales relativamente más cerradas, compensando los efectos de las menores temperaturas ambientales.

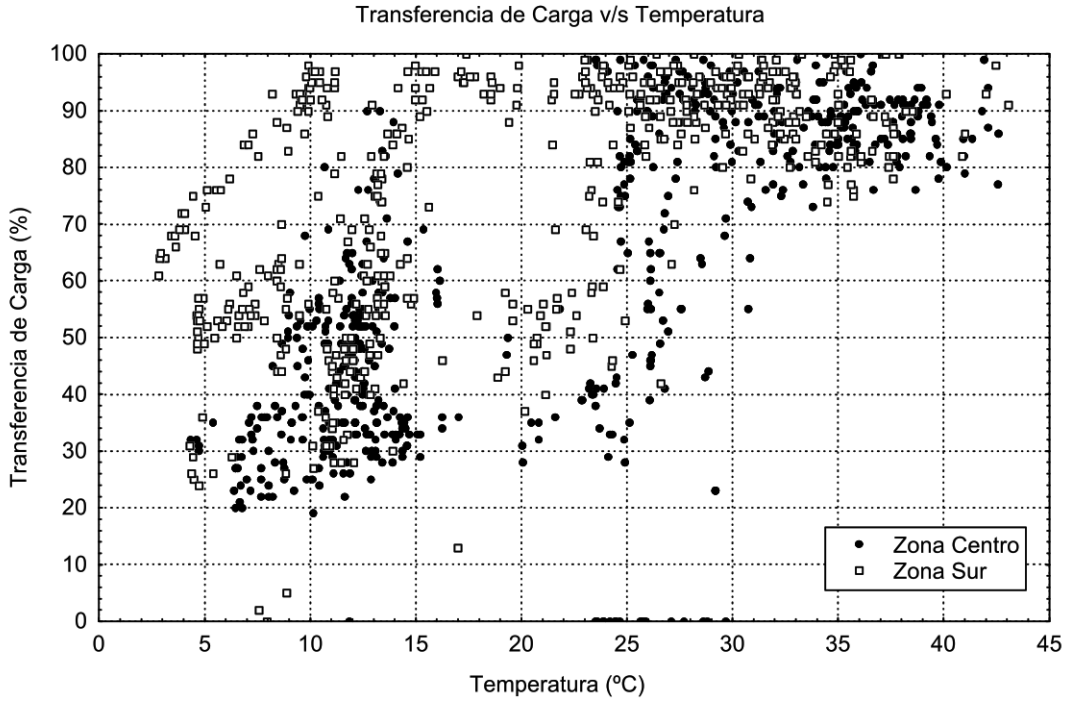


Figura 2.7: *Transferencia de carga en función de la temperatura según la ubicación geográfica.*

Fuente: Cabrera (1998)

En la Tabla 2.15 se muestra la transferencia de carga por estación del año y por ubicación geográfica. El promedio para la zona centro en verano resultó más bajo de lo esperado, esto se debe a que los datos están sesgados por una medición en la Zona Testigo de Lo Vásquez que resultó en una transferencia de carga baja (del orden del 50 %) para un día en particular.

Tabla 2.15: Calificación para eficiencia de transferencia de carga en porcentajes (Cabrera, 1998)

	Zona Centro	Zona Sur
Verano (enero - abril)	77	92
Invierno (mayo - agosto)	43	64
Primavera (septiembre - diciembre)	79	76
Promedio anual	66	77

2.3.5.3. Estudios Internacionales para Pavimentos Rígidos

Introduction to Mechanistic–Empirical Design of New and Rehabilitated Pavements. Reference Manual; NHI Course 131064; US Department of Transportation; Federal Highway Administration, Illinois, 2002.

Los pavimentos de concreto simples experimentan deficiencias en las juntas que pueden manifestarse como varios tipos de deterioros, incluida la transferencia de carga inadecuada, daños en el sellado de juntas, bombeo y grietas.

En general, los deterioros ubicados cerca de la junta del pavimento provocan un debilitamiento de la junta, lo que crea excesivas deflexiones y reduce la transferencia de carga. La transferencia de carga reducida, a su vez, conduce a un deterioro adicional de la junta, agrietamiento y bombeo. La condición general de la junta puede evaluarse determinando la extensión y la gravedad del deterioro de la junta y la capacidad de ella para transferir la carga de un lado de una junta a otra (eficiencia de transferencia de carga, LTE). Una buena eficiencia de transferencia de carga es un factor importante en el desempeño estructural de un pavimento. La Tabla 2.16 presenta los niveles de deterioro de referencia para determinar la idoneidad de las juntas de PCC.

Tabla 2.16: Adaptado de Tabla 5-1.20, niveles de deterioros recomendados para evaluar el estado de la junta de PCC.

Deterioro relacionado a las juntas	Clasificación de la carretera	Nivel de deterioro considerado como		
		Inadecuado	Marginal	Adecuado
Eficiencia de Transferencia de carga media JPC y JRC, %	Interestatal/ Autopista	<60	60 a 80	>80
	Primaria	<55	55 a 75	>75
	Secundaria	<50	50 a 70	>70

Evaluating Load Transfer Restoration, Department of Transportation State of California; Estados Unidos, 2002.

En la sección de recomendaciones se indica lo siguiente: Los pavimentos de hormigón que exhiban una transferencia de carga promedio de 60 % o menos deben considerarse candidatos para la restauración de transferencia de carga. Los sitios de prueba han demostrado que la incorporación de barras de traspaso de carga (dowel bar retrofit, DBR) tiene la capacidad de mejorar la transferencia de carga. **Las evaluaciones de las instalaciones de DBR se deben hacer anualmente**. Se necesitan datos de desempeño a largo plazo para continuar con la evaluación del pavimento. La recolección de datos se debe realizar durante el mismo período del año en condiciones climáticas similares por parte de operadores experimentados y, si es posible, el mismo equipo de FWD. Los datos podrían proporcionar información valiosa para refinar las directrices de instalación e inspección de DBR.

2.4. Parámetros técnicos para evaluar la Capacidad Estructural del pavimento

La utilización de un parámetro que permita evaluar la capacidad estructural de un pavimento es necesaria para que su análisis en un modelo de evaluación por niveles de servicio, nos indique el nivel desempeño de este. Se recopila una serie de parámetros que serán estudiados para la posterior elección de uno y su introducción al modelo.

2.4.1. Deflexión

La deflexión es el valor del desplazamiento vertical en la superficie del pavimento al aplicarle una carga. El valor de la deflexión depende de una serie de factores, entre los que se destacan: la rigidez y espesor del pavimento, su temperatura, además del soporte del suelo de fundación (Contreras, 2015). En pavimentos flexibles, los resultados permiten utilizar el método de diseño de pavimentos AASHTO. En pavimentos rígidos, las deflexiones medidas en el centro de la losa permiten, mediante métodos elásticos de retrocálculo, evaluar las características elásticas del pavimento y del suelo de fundación (Contreras, 2015).

La deflexión nos permite variadas aplicaciones:

- Evaluar la capacidad de soporte de calles, carreteras, aeropuertos y otras superficies, sean flexibles, rígidas o semirrígidas.
- Evaluación de la transferencia de carga en pavimentos de hormigón.
- Detección de vacíos en pavimentos de hormigón (estabilidad de losas).
- Control de calidad.
- Análisis de tramos de prueba.
- Sectorización de zonas dañadas.
- Dimensionamiento de refuerzos.
- Incorporación a Sistemas de Gestión de Pavimentos.

2.4.2. Módulo Elástico

El módulo resiliente de la subrasante (Mr), representa el módulo elástico del suelo luego de aplicar cargas cíclicas sobre él. Este parámetro se emplea para caracterizar el suelo de la subrasante en un pavimento asfáltico y se utiliza en los diseños de pavimentos asfálticos y de recapado asfáltico sobre hormigón. Mediante la técnica del retrocálculo, es posible determinar los módulos de cada una de las capas que conforman la estructura, Para el retrocálculo de las deflexiones se utiliza un modelo simplificado de dos capas; una superior (capas aglomeradas y granulares) y una inferior (suelo de fundación) (Contreras, 2015).

2.4.3. Módulo de Reacción

En los pavimentos rígidos es necesario transformar el valor del módulo resiliente al del módulo de reacción de la subrasante "k_r". La ventaja del uso de este método en lugar del valor de soporte del suelo es, por una parte que permite predecir con suficiente exactitud en el análisis estructural de los sistemas multicapa, la irregularidad, el agrietamiento, el ahuellamiento y otras posibles fallas; por otra parte puede determinarse mediante ensayos no destructivos (García Loncomilla, 2005).

2.4.4. Número Estructural

El número estructural efectivo (Ne_ef) es una evaluación de la capacidad estructural del pavimento al momento de la medición, es un concepto introducido en la prueba AASHTO para caracterizar la capacidad estructural de los pavimentos asfálticos y utilizado por el método AASHTO para el diseño de pavimentos de asfalto (Contreras, 2015). Se definen tres métodos alternativos para establecerlo.

Método del análisis de los componentes: evalúa la calidad del paquete estructural de un pavimento, calculando la capacidad estructural a través de la suma ponderada de los espesores por los coeficientes estructurales, determinados experimentalmente. Los coeficientes estructurales son correlacionables con los módulos de las capas estructurales (Dirección de Vialidad, 2018b).

Método de la vida remanente: este método se basa en la determinación de la reducción de la capacidad estructural del pavimento debido a la fatiga acumulada en los materiales.

Método utilizando ensayos con deflectómetro de impacto FWD (retrocálculo): se obtiene del retrocálculo cuando se dispone de ensayos de deflexión realizados con deflectómetro de impacto, los datos sirven para determinar las propiedades (módulos) de los materiales necesarios para determinar la capacidad estructural efectiva (LanammeUCR, 2009).

2.4.5. Vida Remanente

Este método se basa en la determinación de la reducción de la capacidad estructural del pavimento debido a la fatiga acumulada en los materiales, esto es, que las cargas repetidas dañan gradualmente el pavimento y reducen el número de cargas adicionales que puede soportar y que lo llevan a la falla.

En este caso, se supone que la reducción en la capacidad estructural del pavimento no presentará daños observables pero si una reducción en términos de la cantidad de cargas futuras que puede soportar. Para determinar la "Vida Remanente", el diseñador debe determinar la cantidad de tránsito que el pavimento ha soportado hasta ese momento y la cantidad total de tránsito que se espera, pueda soportar hasta la "falla" (LanammeUCR, 2009).

Bajo el punto de vista de la metodología AASHTO, ambas cantidades de tránsito deben expresarse en términos de Ejes Equivalentes de Diseño. La diferencia entre estos valores, expresado como un porcentaje del tránsito total para la "falla" se define como "Vida Remanente".

Es posible aplicar el método si se conocen las cargas aplicadas al pavimento desde la construcción hasta el momento evaluado, de lo contrario, se puede aplicar un criterio razonable de Ejes Equivalentes para estimarlo.

Analizando la "Vida Remanente" bajo una metodología mecanicista, la cual resultaría más acertada, sólo requeriría conocer el tránsito futuro no en términos de Ejes Equivalentes, mas bien considerar las cantidades de vehículos pesados según sus diferentes tipos y cargas.

2.5. Elección del parámetro técnico más apropiado

En base a la bibliografía revisada y en particular en lo sugerido por European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research (COST) el parámetro más apropiado para evaluar la capacidad estructural sería a través de la evaluación de la vida remanente, el cual puede resultar una simple estimación y de costo mínimo si se cuenta con la información necesaria, pero este no es un parámetro de desempeño que pueda evaluarse directamente a partir de un indicador medido, ya que requiere de un análisis de deterioro más completo. Metodologías mecanicistas resultan ser mas complejas pero más precisas y mejor relacionadas con el comportamiento de las estructuras viales, pero no serán abordadas en esta memoria ya que el objetivo de las misma es proponer una metodología en base a un parámetro sencillo y práctico.

Esta investigación busca un parámetro que se pueda relacionar directamente con un parámetro técnico. Destaca tanto en análisis a nivel de red como a nivel de proyecto, el parámetro "deflexión" como indicador de desempeño base de varios métodos y por ende muy utilizado y práctico para representar la capacidad estructural de una carretera (European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research, 2007).

Una metodología de evaluación a base del parámetro deflexión, puede ser considerada una primera aproximación para los organismos de control, ya que, en la práctica se produce una diferencia entre, lo que el concesionario (o dueño del activo) necesita controlar para acotar sus inversiones, y, lo que el mandante (por ejemplo: el Estado) exige o controla. Esto sucede porque desde el punto de vista del dueño del activo, los métodos mecanicistas son los que les entregan más herramientas de proyección a fin de acotar razonablemente las inversiones futuras.

2.6. Indicadores técnicos para evaluar la Capacidad Estructural del pavimento

Una vez ya seleccionado un parámetro para evaluar la capacidad estructural, se hace necesario definir un indicador que sea útil, práctico y aplicable tanto a pavimentos flexibles como a pavimentos rígidos. Se realiza una búsqueda en la literatura para un posterior análisis de cada una de las alternativas.

2.6.1. Pavimentos Flexibles

Se recopila una serie de indicadores para evaluar pavimentos flexibles desde literatura de Colombia, España, Estados Unidos y Sudáfrica, que se resumen en la Tabla 2.17 y Tabla 2.18:

Tabla 2.17: Resumen de indicadores técnicos (1/2), adaptado de Tabla I: parámetros del cuenco de deflexión de Horak et al. (2015).

INDICADOR	FÓRMULA	INDICADOR ESTRUCTURAL
Deflexión Máxima	D_0, medido desde el centro de la carga	Reflejo de la condición de todas las capas estructurales con una contribución del 70% de la subrasante.
Radio de Curvatura	$RoC = \frac{L^2}{2D_0\left[\left(\frac{D_0}{D_{200}}\right)-1\right]}$ Donde L = 200 mm para mediciones con FWD	Reflejo de la condición estructural de la superficie y parte superior de la capa base.
Índice de Capa Base, BLI	$BLI = D_0 - D_{300}$	Reflejo de la condición estructural de la capa base o capas asociadas a la profundidad evaluada (hasta los 300 mm aproximadamente).
Índice de Capa Media, MLI	$MLI = D_{300} - D_{600}$	Reflejo de la condición estructural de la subbase o capa asociada a la profundidad evaluada (entre los 300 y 600 mm aproximadamente).
Índice de Capa Inferior, LLI	$LLI = D_{600} - D_{900}$	Reflejo de la condición estructural de la subbase o capa asociada a la profundidad evaluada (entre los 600 y 900 mm aproximadamente).
Factores de Forma, F_i	$F_1 = \frac{(D_0 - D_{600})}{D_{900}}$	El factor de forma F_2 pareció dar mejores correlaciones con los módulos de la subrasante, mientras que F_1 dio correlaciones débiles.
	$F_2 = \frac{(D_{300} - D_{900})}{D_{600}}$	
	$F_3 = \frac{(D_{600} - D_{1200})}{D_{900}}$	Condición de capas inferiores o profundas hasta una capa rígida.
Área bajo el perfil del pavimento, A_{upp}	$A_{upp} = \frac{(5D_0 - 2D_{300} - 2D_{600} - D_{900})}{2}$	Reflejo de la respuesta de toda la estructura del pavimento.

Tabla 2.18: Resumen de indicadores técnicos (2/2) adaptado de Tabla I: parámetros del cuenco de deflexión de Horak et al. (2015).

INDICADOR	FÓRMULA	INDICADOR ESTRUCTURAL
Área, A (Hall and Thompson)	$A = \frac{6(D_0 - 2D_{300} - 2D_{600} - D_{900})}{D_0}$	Reflejo de la respuesta de toda la estructura del pavimento (pero con correlaciones débiles)
Áreas Adicionales, A_i	$A_2 = \frac{6(D_{300} + 2D_{450} + D_{600})}{D_0}$	Condición de la capa media
	$A_3 = \frac{6(D_{600} + 2D_{900} + D_{1200})}{D_0}$	Condición de las capas inferiores
Índices de área, AI_i	$AI_1 = \frac{D_0 + D_{300}}{2D_0}$	Condición de la capa superior
	$AI_2 = \frac{D_{300} + D_{600}}{2D_0}$	Condición de la capa media
	$AI_3 = \frac{D_{600} + D_{900}}{2D_0}$	Condición de la capa media
	$AI_4 = \frac{D_{900} + D_{1200}}{2D_0}$	Condición de la capa inferior
Spreadability, S	$S = \frac{\left\{\left[\frac{(D_0 + D_{300} + D_{600} + D_{900})}{5}\right] 100\right\}}{D_0}$	Reflejo de la respuesta de toda la estructura del pavimento (correlaciones débiles)
Pendiente de Deflexión, SD	$SD = \frac{\tan^{-1}(D_0 - D_{600})}{600}$	Débiles correlaciones observadas condición capa media
Curvatura de la Deflexión	$D_0 - D_{200}$	Condición de la rigidez del material, desempeño de fatiga del pavimento
Factor de curvatura del cuenco, CBF	$CBF = \frac{D_0 + D_r}{D_0}$	Condición de la capa equivalente de la profundidad r
Razón de Deflexión, DR	$DR = \frac{D_0}{D_r}$	Condición de la capa equivalente de la profundidad r

Donde:

D_r : Deflexión a "r" mm del centro de aplicación de la carga.
D_0 : Deflexión bajo el centro de aplicación de la carga.
D_{200} : Deflexión a 200 mm del centro de aplicación de la carga.
D_{300} : Deflexión a 300 mm del centro de aplicación de la carga.
D_{450} : Deflexión a 450 mm del centro de aplicación de la carga.
D_{600} : Deflexión a 600 mm del centro de aplicación de la carga.
D_{900} : Deflexión a 900 mm del centro de aplicación de la carga.

Los indicadores presentados en las Tablas 2.17 y 2.18, son utilizados al aplicar comunmente al pavimento una carga de 40 o 50 kN, sin embargo, existen algunos, como la deflexión máxima o el radio de curvatura, que en España son utilizados a cargas de 68.67, 98.10 y 127.53 kN.

Los indicadores de área pueden ser utilizados como un medio para cuantificar la rigidez relativa de una sección de pavimento, el uso de más de un parámetro puede proporcionar información complementaria que puede ser útil para diferenciar secciones de pavimento que no son homogéneas (García, sf), como por ejemplo la combinación de deflexión máxima D_0 y área bajo el perfil del pavimento (A_{upp}), que se muestra en la Tabla 2.19.

Tabla 2.19: Tendencia del estado del pavimento según combinación de indicadores A_{upp} y D_0 (García, sf).

A_{upp}	D_0	Conclusión
Baja	Baja	Estructura fuerte, subrasante fuerte
Baja	Alta	Estructura fuerte, subrasante débil
Alta	Baja	Estructura débil, subrasante fuerte
Alta	Alta	Estructura débil, subrasante débil

De igual manera en términos de área A (Hall and Thompson) combinada con deflexión máxima (D_0) según la Tabla 2.20.

Tabla 2.20: Tendencia del estado del pavimento según combinación de indicadores A y D_0 (García, sf).

A	D_0	Conclusión
Baja	Baja	Estructura débil, subrasante fuerte
Baja	Alta	Estructura débil, subrasante débil
Alta	Baja	Estructura fuerte, subrasante fuerte
Alta	Alta	Estructura fuerte, subrasante débil

La Figura 2.8 muestra el comportamiento del cuenco de deflexión y cómo interactúan los indicadores de área. El enfoque del A_{upp} captura de mejor manera el comportamiento del pavimento en una ubicación determinada, debido a que representa la geometría de todas las variables incluyendo deterioros como efectos del agrietamiento térmico (Thompson & Álvarez, 1998).

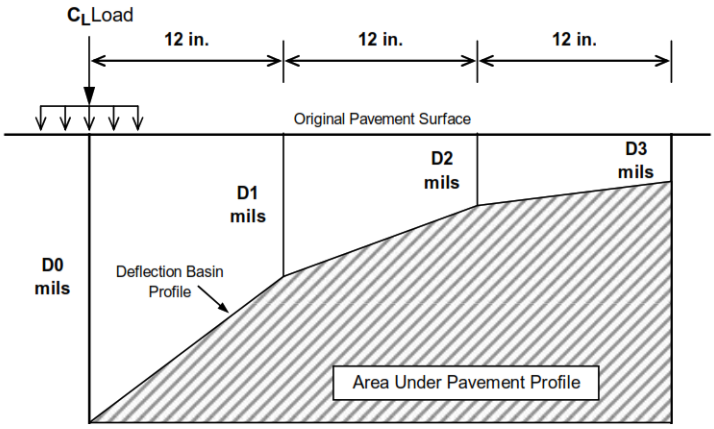


Figura 2.8: *Parámetros de área del cuenco de deflexión.*

Fuente: García (sf)

2.6.2. Pavimentos Rígidos

Se recopilan indicadores para evaluar pavimentos rígidos, de la literatura nacional e internacional revisada, el Manual de Carreteras contiene aquellos de mayor interés, definiéndose a continuación.

Indicador de Transferencia de Carga

Según lo indicado por el Manual de Carreteras Volumen N°8, Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control del Ministerio de Obras Públicas 2018, cuando se realiza una deflexión ubicando el plato de carga en la losa de salida respecto de una junta, es posible evaluar la transferencia de carga en esta junta mediante la expresión:

$$TC\,\% = 100 \cdot \frac{D_{30}}{D_0} \cdot \frac{D_0^*}{D_{30}^*} \tag{2.6.6}$$

Donde:

D_0	: Deflexión en el punto de carga ubicado en la losa de salida.
D_{30}	: Deflexión a 30 cm del centro de aplicación de la carga sobre la losa de entrada.
$D_0^*\ y\ D_{30}^*$	: Deflexión en el punto de carga y a 30 cm para una deflexión en el centro de la losa. Este cociente conservadoramente puede considerarse 1.

Indicador de vacíos bajo las losas

Método de proyección a carga cero:
Según lo indicado por el Manual de Carreteras Volumen N°8, del Ministerio de Obras Públicas 2018, se realizan deflexiones en la esquina exterior de la losa de salida de una junta, a tres niveles de carga distintos. Cada nivel de carga producirá una deflexión máxima diferente y asociada al nivel de carga. Considerando estos resultados se calcula la deflexión proyectada a carga cero kN. La existencia de deflexiones proyectadas con magnitudes mayores a cero indica la existencia de vacíos bajo la losa.

Método de deflexión diferencial:
Según lo indicado por el Manual de Carreteras Volumen N°8, del Ministerio de Obras Públicas 2018, se realizan deflexiones en las esquinas exteriores de las losas de entrada y salida a un nivel de carga superior a 40 kN. Se compara las deflexiones máximas a ambos lados de la junta. Se informa la diferencia en micrones de ambas deflexiones. Se grafica con respecto al kilometraje las deflexiones de entrada y simultáneamente con las deflexiones de salida, la existencia de una diferencia sistemática entre ambas curvas indica la existencia de vacíos bajo las losas.

2.7. Elección del indicador técnico más apropiado

Hecha la recopilación de indicadores, se realiza un análisis de cada una de las alternativas, estudiando la experiencia y literatura nacional e internacional para pavimentos flexibles y rígidos.

2.7.1. Pavimentos Flexibles

Un solo indicador no parece ser la mejor manera de evaluar la respuesta del estado de un pavimento, es necesario complementar la información que entrega el cuenco de deflexión para verificar la condición de cada capa que conforma el pavimento y la subrasante que lo soporta.

En base a la bibliografía revisada, internacionalmente, el indicador que más se utiliza en la evaluación de capacidad estructural de pavimentos corresponde a la deflexión en el punto de aplicación de la carga D_0, por sí solo ya es un instrumento contundente, que se relaciona a la condición de todo el paquete estructural del pavimento con una contribución del 70 % de la subrasante.

Otros parámetros proporcionados por el FWD funcionan de manera menos eficaz, como la curvatura de deflexión o radio de curvatura, esto debido a la proximidad entre el borde de la placa de carga y el geófono de 200 mm. Austroads excluyó de sus procedimientos de diseño el cálculo de la curvatura por este mismo problema en asfaltos de menos de 40 mm (Horak and Emery, 2006).

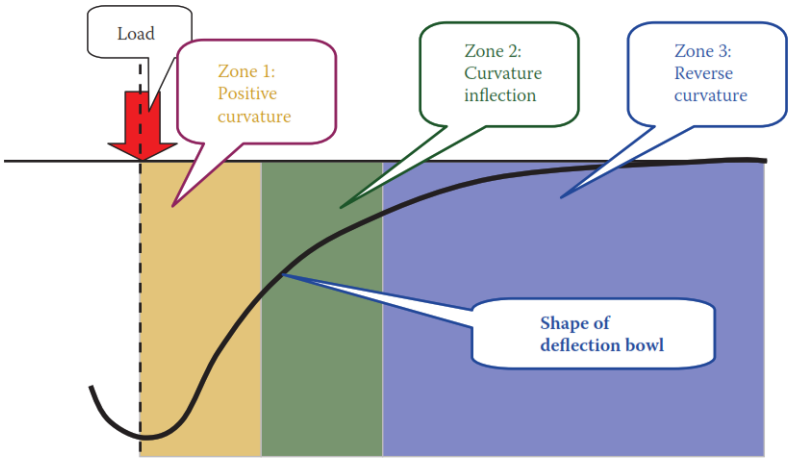


Figura 2.9: *Zonas de curvatura para un cuenco de deflexión.*

Fuente: Horak (2008)

La Figura 2.9 muestra la forma de un cuenco de deflexión medido bajo la carga de una rueda, ésta se puede describir en términos de tres zonas distintas. En la zona 1, la más cercana al punto de carga, el cuenco de deflexión tiene una curvatura positiva, esta zona normalmente se encontrará dentro de

un radio de no más de 300 mm desde el punto de carga. La zona 2 es la zona donde el cuenco de deflexión cambia de una curvatura positiva a una curvatura inversa y se le denomina zona de inflexión. La posición exacta del punto de inflexión en la zona 2 depende de factores específicos de composición estructural de la capa de pavimento, normalmente se encuentra aproximadamente desde los 300 mm hasta 600 mm desde el punto de carga. La zona 3 se encuentra más alejada del punto de carga, donde el cuenco de deflexión ha cambiado a una curvatura inversa y se extiende a la superficie de la carretera, en otras palabras, donde la deflexión vuelve a cero, normalmente se extiende aproximadamente desde 600 mm a 2000 mm desde el punto de carga, aunque su extensión dependerá de la profundidad real de la estructura del pavimento y de la respuesta estructural de la subrasante (Horak, 2008).

Estas tres zonas del cuenco de deflexión pueden asociarse y vincularse a diversos parámetros. El índice de capa base (BLI) se correlaciona bien con la zona 1 (principalmente capas de superficie y base), el índice de capa media (MLI) se correlaciona con la zona 2 (principalmente capa de subbase), y el índice de capa inferior (LLI) se correlaciona con la zona 3 (capas más bajas y subrasante).

El objetivo es considerar indicadores que sean prácticos, útiles y permitan reflejar la condición estructural del pavimento, por lo que se identificarán aquellos cuya información sea de relevancia particular de una capa a una determinada profundidad como también el que mejor represente la condición de la estructura del pavimento en términos generales.

Se define como los indicadores más apropiados a considerar, los establecidos en la Tabla 2.21:

Tabla 2.21: Indicadores técnicos más apropiados.

INDICADOR	FÓRMULA	INDICADOR ESTRUCTURAL
Deflexión Máxima	D_0, medición al centro de la carga	Reflejo de la condición de todas las capas estructurales con una contribución del 70% de la subrasante.
Índice de Capa Base, BLI	$BLI = D_0 - D_{300}$	Reflejo de la condición estructural de la capa base o capas asociadas a la profundidad evaluada (hasta los 300 mm aproximadamente).
Índice de Capa Media, MLI	$MLI = D_{300} - D_{600}$	Reflejo de la condición estructural de la subbase o capa asociada a la profundidad evaluada (desde 300 hasta 600 mm aproximadamente).
Índice de Capa Inferior, LLI	$LLI = D_{600} - D_{900}$	Reflejo de la condición estructural de las capas bajas y subrasante o capa asociada a la profundidad evaluada (desde 600 hasta 900 mm aproximadamente).

Los indicadores deben ser utilizados bajo los resultados a obtener de la aplicación de una carga en el pavimento de 50 kN.

2.7.2. Pavimentos Rígidos

En pavimentos de hormigón simples sin pasadores, la importancia de la transferencia de carga radica del hecho empírico y teóricamente reconocido de que los esfuerzos internos inducidos por las cargas de tránsito dependen en gran medida por la capacidad de colaboración estructural de las losas vecinas. El deterioro de la transferencia de carga implica un aumento progresivo del nivel de esfuerzos y por ende el agrietamiento de la losa en un número reducido de ciclos de repeticiones (IDIEM, 2001).

La MEPDG proporciona una guía para la recopilación de datos para definir la evaluación del estado del pavimento, en ella resume pasos y actividades para evaluar de forma detallada la condición del pavimento existente. Para la evaluación estructural a través de ensayos no destructivos con FWD sugiere una verificación de la eficiencia de la transferencia de carga en las juntas (load transfer efficiency, LTE). Por otro lado, indica la verificación de la existencia de vacíos debajo de los pavimentos de tipo PCC a través de ensayos GPR (AASHTO, 2008).

Se recomienda que los ensayos no destructivos de deflexión deberían ser una parte integral de cualquier evaluación estructural del pavimento para el diseño de una rehabilitación o para un seguimiento del estado de estos. Para las JPCP, las deflexiones pueden ser medidas a la mitad de la losa (condición intacta), a lo largo de las juntas transversales y a lo largo del borde de las losas para evaluar la LTE y verificar si hay presencia de huecos debajo de la capa de PCC (AASHTO, 2008).

La evaluación de la LTE de las juntas y fisuras en pavimentos rígidos se utiliza para seleccionar estrategias de rehabilitación, identificación de reparaciones (por ejemplo, rehabilitación de las pasajuntas o barras de transferencia) y en la evaluación del potencial fisuramiento por reflexión si el pavimento de concreto con juntas es recapado con HMA (AASHTO, 2008).

Es posible detectar la existencia de vacíos bajo el pavimento de manera temprana mediante inspección visual, por lo que no se hace necesaria su verificación a través de estos método ni para ser un parámetro de evaluación estructural, ya que de haber vacíos bajo la losa, otros parámetros o deterioros acusarían su existencia de manera previa.

Se define como indicador apropiado para evaluar el desempeño de un pavimento rígido la transferencia de carga, TC %:

$$TC\,\% = 100 \cdot \frac{D_{300}}{D_0} \cdot \frac{D_0^*}{D_{300}^*} \tag{2.7.7}$$

Donde:

D_0	: Deflexión en el punto de carga ubicado en la losa de salida.
D_{300}	: Deflexión a 300 mm del centro de aplicación de la carga sobre la losa de entrada.
$D_0^*\, y\, D_{300}^*$	: Deflexión en el punto de carga y a 300 mm para una deflexión en el centro de la losa. Este cociente conservadoramente puede considerarse 1.

2.8. Equipos para medir la Capacidad Estructural en pavimentos

Definidos los parámetros e indicadores técnicos a utilizar para la evaluación de la capacidad estructural de los pavimentos, se realiza una recopilación de equipos que permiten levantar la información necesaria para el seguimiento del comportamiento de los pavimentos, posteriormente se analizarán las alternativas para la selección de la mejor opción.

2.8.1. Viga Benkelman

El dispositivo de Viga Benkelman (Benkelman Beam, BB) es un equipo de ensaye no destructivo que utiliza una rueda doblemente cargada con 40 kN (Contreras, 2015), mide la deflexión relativa de una viga pivotante a una viga base en un punto en el pavimento mientras la rueda de carga de prueba (normalmente el eje trasero de un camión) transita lentamente (nominalmente a 4 a 5 km/h) a lo largo de la superficie del pavimento. El proceso de prueba es relativamente lento. Durante la auscultación, el operador camina detrás del camión, que se detiene en cada punto de prueba mientras el BB está en posición para la prueba (Austroads, 2008).

Para un BB, la carga de prueba estándar consiste en un eje simple de rodado doble. Debido a las dificultades prácticas para mantener la presión de los neumáticos en un vehículo en operación, es probable que se generen variaciones de hasta 5 % en la presión durante una jornada. Este equipo mide la deflexión relativa hasta cualquier distancia deseada de la carga de la rueda, aunque esta distancia a menudo es limitada, dependiendo del tiempo disponible para registrar la información (Austroads, 2008).

Mejoras como la medición electrónica y el registro automatizado de deflexiones mejoran la precisión de los datos y la eficiencia de la operación de levantamiento de información. Se pueden usar dos BB simultáneamente, uno en cada huella de la rueda, proporcionando datos de deflexión relativamente confiables en un punto (Austroads, 2008).

Las Vigas Benkelman se utilizan para pruebas de deflexión a nivel de proyecto en carreteras, pueden ser útiles para evaluaciones de la resistencia del pavimento a pequeña escala de niveles de red, pero debido a la baja tasa de muestreo, su naturaleza intensiva en mano de obra y consideraciones de seguridad, es poco probable que los requerimientos de un muestreo de la red con el dispositivo de Viga Benkelman sea económicamente viable (Austroads, 2008).

El uso de la viga Benkelman presenta ventajas derivadas de su bajo costo, de la facilidad de uso y de la existencia de una base de datos casi ilimitada, generada por su uso generalizado durante muchos años. En contraposición, su empleo trae asociados algunos problemas técnicos importantes, entre ellos

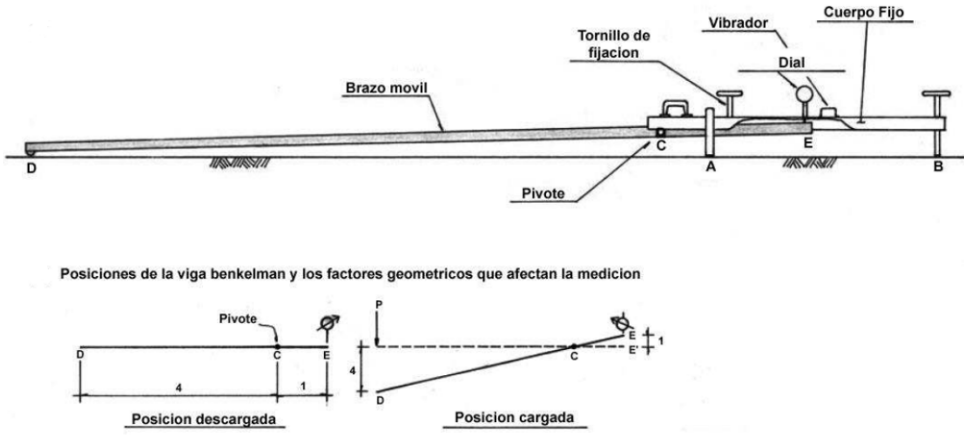


Figura 2.10: *Dispositivo Viga Benkelman.*

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016a)

la lentitud en la determinación de las deflexiones, la cual no simula adecuadamente la acción de las cargas móviles del tránsito; la necesidad de un control permanente del tránsito en la vía durante las mediciones; la necesidad de mano de obra intensiva, la dificultad o imposibilidad de determinar adecuadamente la forma y el tamaño del cuenco de deflexiones; la imposibilidad de asegurar que las patas frontales de la viga no se encuentren dentro de la deformada en el instante de realizar la medida y, por último, la escasa repetibilidad de las medidas (Ministerio de Transporte, 2008).

Algunos dispositivos que usan este sistema lento de medida de deflexión tienen cierta automatización, por lo que se denominan cuasi-estáticos. Entre ellos se encuentran el curviámetro y el deflectógrafo Lacroix. Aunque con estos equipos se superaron algunos de los problemas técnicos de la viga Benkelman, se mantuvo el mayor de ellos, consistente en el hecho de que el método de aplicación de la carga no representa adecuadamente los efectos de las cargas móviles del tránsito vehicular (Ministerio de Transporte, 2008).

2.8.2. Deflectógrafo

Un Deflectógrafo (Deflectograph, DFG) es similar a un par de Vigas Benkelman cortas montadas en un trineo debajo del chasis de un camión anfitrión. A medida que el camión avanza a una velocidad relativamente constante (3 a 4 km/h), la viga del DFG es colocada para testear, se levanta y se vuelve a colocar en un ciclo continuo. La carga de prueba se aplica a través de ambas ruedas en movimiento en el eje trasero del camión anfitrión. El DFG registra deflexiones descendentes en la mitad del cuenco de deflexión en ambas huellas de la rueda con muestreo casi continuo en espaciamientos longitudinales de entre 3 a 7 metros y en una serie de desplazamientos de 50 mm de separación hasta al menos 1200 mm delante de la carga de prueba estándar aplicada (Austroads, 2008).

Para el levantamiento de información de deflexión a nivel de red, un DFG logra una mayor tasa de progreso a lo largo de la carretera y registra un mayor número de mitad de cuencos de deflexión (es decir, espaciamientos longitudinales de muestra más cortos) que un Viga Benkelman (Austroads, 2008).

Deflectómetro Lacroix

Equipo autopropulsado no destructivo que utiliza una Viga Benkelman automatizada para medir la deflexión del pavimento ante la presencia de una carga móvil proporcionada por el mismo vehículo, su fabricante es WDM de Inglaterra y tiene una velocidad de operación de 2,5 km/h. Llegó a Chile en 1985. Dispone de un mecanismo computacional que registra las deflexiones y mueve automáticamente la viga a su siguiente posición de lectura sin detenerse (Contreras, 2015).

Figura 2.11: *Dispositivo Deflectómetro Lacroix adquirido por Chile.*

Fuente: Contreras (2015)

Figura 2.12: *Dispositivo Deflectómetro Lacroix moderno.*

Fuente: Geocisa (2014)

2.8.3. Curviámetro

El Curviámetro es un equipo de carga estática, cuyo eje trasero está lastrado con una carga de 13 toneladas, siendo la distancia entre ejes cinco metros. La adquisición de datos se realiza cada 5 metros a una velocidad de 18 km/h. Como parámetros principales se obtienen la deflexión en el punto de mayor deformación, el radio de curvatura en dicho punto y la anchura de la deformada, que se define como la distancia entre sus puntos de inflexión. El elemento mecánico principal está formado por una cadena en forma de oruga que gira a una velocidad sincronizada con el vehículo. Sobre esta cadena, que se coloca entre las ruedas gemelas derechas traseras, están instalados los tres sensores de medida (Geocisa, 2014).

Figura 2.13: *Dispositivo Curviámetro.*

Fuente: Geocisa (2014)

2.8.4. Deflectómetro de Impacto

Un deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD) es un dispositivo cuya característica principal es realizar un ensaye, no destructivo, rápido y económico que permite evaluar objetivamente, in situ, tanto el valor de soporte de la subrasante, como la capacidad estructural del pavimento existente (Contreras, 2015), diseñado para simular la deflexión de una superficie de pavimento causada por un vehículo en movimiento (Austroads, 2008). El FWD es montado sobre un remolque y registra la deflexión de la mitad del cuenco de deflexión en puntos discretos sobre la superficie del pavimento (Contreras, 2015).

El FWD genera una carga descargando un peso. Esta carga se transmite al pavimento a través de una placa de carga circular de 300 mm de diámetro. El pulso de carga generado por el FWD deforma momentáneamente el pavimento debajo de la placa de carga en forma de cuenco (Schmalzer, 2006).

Se aplica para medir deflexiones en superficies con pavimentos flexibles, pavimentos de hormigón, pavimentos compuestos (recapados), capas granulares y suelos de fundación (Contreras, 2015).

Basado en la fuerza impartida al pavimento y la forma del cuenco de deflexión, es posible estimar la rigidez del pavimento mediante el uso de diversos métodos computacionales. Si se conoce el espesor de las capas individuales, también se puede calcular la rigidez de esas capas. Además, un FWD se puede usar para determinar la eficiencia de transferencia de carga. (Schmalzer, 2006).

(a) Dispositivo KUAB FWD.

(b) Dispositivo Dynatest FWD.

Figura 2.14: *Dispositivos FWD de diferentes proveedores.*

Fuente: Federal Highway Administration (2011)

Un FWD tiene dos tipos de dispositivos de medición principales. El primero es una celda de carga, ubicada directamente arriba de la placa de carga que mide la fuerza impartida al pavimento y el segundo es un sensor de deflexión. La mayoría de los FWD usan geófonos como sensores de deflexión colocados a distancias fijas de la placa de carga para medir la forma del cuenco de deflexión (Schmalzer, 2006). Estos geófonos miden la velocidad vertical que al integrarla, resulta el desplazamiento vertical, poseen un rango de hasta 5 mm, con una resolución de un micrómetro. Son 7 sensores de deflexión, los cuales pueden ser ubicados en las posiciones: 0, 200, 300, 450, 600, 900 y 1200 mm desde el centro de la carga (Contreras, 2015). Equipos Kuab utilizan sismómetros, que miden la aceleración vertical, el proceso requiere de una doble integración para obtener los desplazamientos verticales.

Este equipo ha sido implementado para diferentes niveles de evaluación: reconocimiento general de la estructura de un pavimento, reconocimiento rutinario utilizado para los diseños de proyectos de construcción, refuerzo o rehabilitación, análisis específicos de la estructura de un pavimento y controles de tipo receptivo (Contreras, 2015).

2.8.5. Traffic Speed Deflectometer

El Traffic Speed Deflectometer (TSD) es un camión articulado con una carga en el eje trasero, para medir la capacidad estructural a nivel de red de manera continua mientras se conduce a velocidad de tránsito. Los datos proporcionan perfiles de deflexión del pavimento de manera continua, a partir de los cuales se pueden obtener índices de capacidad estructural y estimar la fatiga o vida residual del pavimento. Los datos del TSD son de una alta precisión y resolución, útiles para planificar exactamente dónde intervenir o rehabilitar. El TSD puede combinar diferentes subsistemas que recopilen diferentes datos simultáneamente y se sincronizan con datos estructurales, además de poder agregar eventos (Greenwood Engineering, 2018).

El TSD, es desarrollado por Greenwood Engineering de Dinamarca, utiliza sensores láser Doppler para medir la velocidad de la deflexión vertical de la superficie del pavimento a medida que se deforma hacia abajo, en lugar de desplazamiento directamente. La deflexión, se estima mediante el análisis de la velocidad de deflexión. La tecnología basada en láser Doppler se ha aplicado para superar el desafío particular de registrar valores de deflexión que típicamente pueden ser al menos un orden de magnitud menor que la textura de la superficie del pavimento en la que se miden. Los resultados de extensas pruebas de campo realizadas por el Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussees (LCPC) utilizando un primer prototipo de sensor único, y el trabajo más reciente y en curso en dos prototipos avanzados (cada uno con tres sensores Doppler), por el Danish Road Institute (DRI) y el Laboratorio de Investigación de Transporte del Reino Unido (TRL) han demostrado una impresionante repetibilidad (Austroads, 2008).

Figura 2.15: *Dispositivo TSD*

Fuente: Flintsch et al. (2013)

Actualmente existen dos modelos del dispositivo TSD, uno de cuatro y otro de siete láseres Doppler montados en una viga servohidráulica para registrar la velocidad de deflexión de un pavimento cargado.

Los láseres Doppler para uno de los modelos, se posicionan de forma que midan la velocidad de deflexión a un rango de distancias delante del eje trasero: 100, 200 y 300 mm; y 100, 300 y 750 mm. El cuarto sensor, que actúa como un láser de referencia, se coloca a 3.6 m delante del eje trasero, en gran parte fuera del cuenco de deflexión. La viga en la cual los láseres están montados se mueve hacia arriba y hacia abajo en oposición al movimiento del remolque para mantener los láseres a una altura constante desde la superficie del pavimento. Los datos se registran a una velocidad de auscultación de 70 km/h a una velocidad de 1000 Hz, es decir, un espaciado de 20 mm de las mediciones en bruto. Estos resultados generalmente se informan como un promedio de más de 10 m (Schmalzer, 2006).

Como el TSD ausculta a velocidad del tránsito, es posible medir varios kilómetros al día, sin la necesidad de cerrar la carretera mientras está en ejecución por lo que ofrece un nivel de producción y seguridad que no posee otro tipo de dispositivo. El TSD solo requiere de un conductor para el camión y un operador que monitorea y controla los sensores, no hay personas presentes en el remolque durante la operación. El TSD mide la velocidad de deformación vertical en cada posición del láser Doppler, como respuesta dinámica a la carga del eje en lugar de simular un impulso de carga de un camión (Greenwood Engineering, 2018).

El dispositivo ha sido utilizado en Dinamarca, Australia, Reino Unido, Italia, Polonia, China, Estados Unidos, Nueva Zelanda, Sudáfrica y Alemania.

Figura 2.16: *Conductor y Operador del TSD*

Fuente: Greenwood Engineering (2018)

La investigación con el TSD presente en el Reino Unido, ha demostrado que el tipo de superficie puede influir en la respuesta de los sensores de velocidad. En particular, las nuevas superficies ricas en aglutinantes pueden causar un funcionamiento defectuoso de los sensores de velocidad en el TSD, pero el rendimiento de medición normal vuelve después de algunos meses de tránsito ya que el revestimiento se vuelve menos reflectante. De lo contrario, el equipo funciona de manera confiable en una amplia gama de superficies, incluido el concreto rígido (Flintsch et al., 2013).

En cuanto a la eficiencia de transferencia de carga en las juntas, la investigación sugiere que el TSD puede tener el potencial de evaluar la eficiencia de transferencia en las juntas, pero se necesita un mayor trabajo para hacer de esto una propuesta de rutina práctica (Flintsch et al., 2013).

2.8.6. Rolling Wheel Deflectometer

El Rolling Wheel Deflectometer (RWD) se basa en el método espacialmente coincidente para medir las deflexiones del pavimento. Tres láseres ubicados en frente del par de neumáticos (lejos de la carga aplicada y, por lo tanto, del cuenco de deflexión) se utilizan para medir la superficie del pavimento sin carga y un cuarto láser (se agregaron láseres adicionales en una versión más nueva), ubicado entre el par de neumáticos y justo detrás del eje trasero mide la deflexión de la superficie del pavimento. La deflexión se calcula al comparar escaneos "espacialmente coincidentes" a medida que el RWD avanza. El RWD aplica una carga de 40 kN a través de 2 ruedas espaciadas a 330 mm de distancia y ausculta información a velocidades de hasta 80 km/h. El perfil de deflexión se obtiene restando el perfil de la forma deflectada de la forma no deflectada medida en la misma ubicación. El RWD ausculta con una frecuencia de muestreo de 2 kHz, es decir, cada 11 mm a 80 km/h, y promedia los valores de deflexión en secciones más largas, típicamente 160 m, para proporcionar una medición de deflexión única (Flintsch et al., 2013)).

Figura 2.17: *Dispositivo RWD*

Fuente: Flintsch et al. (2013)

Figura 2.18: *Primer plano del sensor láser colocado entre neumáticos duales*

Fuente: Flintsch et al. (2013)

2.8.7. Road Deflection Tester

El Road Deflection Tester (RDT) es un dispositivo construido en Suecia, no destructivo, que consiste en un camión que se ha readaptado con dos conjuntos de telémetros láser, cada uno de los cuales consta de 20 sensores dispuestos en una línea transversal a la dirección de desplazamiento. El primer conjunto se coloca a 2,5 m detrás de las ruedas delanteras, y el segundo conjunto se coloca a 0,5 m detrás de las ruedas traseras. Por lo tanto, la distancia entre los dos conjuntos es de aproximadamente 4 m. El primer conjunto mide el perfil de deflexión transversal en gran parte fuera del cuenco de deflexión; el segundo mide el perfil de deflexión cerca del centro del cuenco de deflexión, compara los valores ante la carga del eje. El peso del motor del camión (ubicado en la parte trasera de este) en conjunto con otros pesos puede producir una fuerza de 40 a 70 kN en el eje trasero. El hardware de muestreo funciona a una frecuencia de muestreo de 1 kHz, y a una velocidad de 70 km/h. Las muestras se almacenan cada 20 mm, pero normalmente se informan a intervalos de 50 m (Flintsch et al., 2013).

Se esperaba poder medir continuamente el estado de carga y descarga de un pavimento mientras se viaja a velocidades de autopista (80 km/h). Sin embargo, la precisión de los resultados, ha sido muy variable durante las pruebas realizadas en el Reino Unido y Francia. El programa sueco de investigación RDT ha sido descontinuado desde entonces (Austroads, 2008).

Figura 2.19: *Dispositivo RDT*

Fuente: Flintsch et al. (2013)

2.8.8. Dispositivo de medición de deflexión basado en imágenes

El equipo de medición no destructivo de deflexión basado en imágenes (Image-Based Deflection Measurement, IDM) ha sido desarrollado por LCPC Nantes y LRPC Strasbourg en Francia utilizando la proyección de un patrón estructurado en la superficie de la carretera. Una cámara captura la superficie y el software analiza la deformación del patrón, midiendo así la deflexión del pavimento. La técnica ha sido verificada en el laboratorio, en pruebas estáticas y con una carga en movimiento a 4 km/h. El desarrollo continúa para convertir este dispositivo en una poderosa herramienta de medición operacional (Flintsch et al., 2013).

Figura 2.20: *Dispositivo IDM*

Fuente: Flintsch et al. (2013)

2.9. Elección del equipo de medición más apropiado

Es posible encontrar una serie de investigaciones que clasifican y detallan diversos dispositivos que realizan auscultaciones de deflexión en pavimentos, no es objetivo de este proyecto ahondar en ello, por lo que se mostraron sólo aquellos que resultan de interés por la disponibilidad en el mercado, sofisticación, precisión, rendimiento, tecnología, entre otras características.

El proyecto busca la automatización de las mediciones, rendimientos de auscultación a velocidad de tránsito, que brinde seguridad a conductores y operadores del equipo, por lo que se descarta de inmediato el dispositivo de Viga Benkelman. A nivel de proyecto no resultan atractivos aquellos dispositivos de alto rendimiento cuyo objetivo es levantar información a nivel de red, dispositivos como el RDT, RWD o el TSD, que pese a tener buenas correlaciones con el FWD (RWD y TSD), no están diseñados o bien desarrollados para mediciones en pavimentos rígidos (RDT y RWD), además, el costo de adquisición de ellos resultaría demasiado elevado para un concesionario.

Cabe destacar que no es posible adquirir el RWD ya que no se encuentra una versión disponible al mercado, fue analizado por su metodología de medición y tecnología aplicada.

Aquellos dispositivos automatizados como el Deflectógrafo o el Curviámetro circulan a velocidades menores a 20 km/h, rendimiento que puede ser superado con una buena operación del FWD.

En Chile existen al menos 4 dispositivos del tipo FWD, cuyas condiciones de operación, repetibilidad y precisión de datos han sido ampliamente aprobados por la experiencia en el país como también en el extranjero y confirmada en variadas publicaciones y estudios.

A continuación, se enumera una serie de características que hacen más atractivo el uso del Deflectómetro de Impacto (FWD) por sobre los otros dispositivos definidos previamente:

- Versatilidad.
- No destructivo (no altera el pavimento).
- Bajo costo de adquisición y operación.
- Alta precisión.
- Mide deflexiones en varios puntos del cuenco.
- Simula la carga de rueda en movimiento (mejor simulación de carga real).
- Operación relativamente rápida (suficiente a nivel de proyecto).
- Ampliamente usado en el mundo.
- Rápida adquisición de datos.

- Requiere poca preparación del pavimento.
- No requiere de puntos de referencia fijos.
- Funcional sobre una amplia gama de superficies sean calles, carreteras o aeropuertos de pavimentos flexibles, rígidos o semirrígidos.
- Evaluación de la transferencia de carga en pavimentos de hormigón.
- Permite la detección de vacíos en pavimentos de hormigón (estabilidad de losas).

2.10. Propuesta de procedimiento de análisis de la capacidad estructural del pavimento para carreteras concesionadas en Chile

Para generar una propuesta de procedimiento de análisis de la capacidad estructural del pavimento a través de la deflexión para carreteras concesionadas, se realiza una búsqueda de investigaciones, manuales y especificaciones para cada aspecto del seguimiento de los pavimentos para definir de manera objetiva la metodología a seguir y ser incorporada a las nuevas concesiones.

2.10.1. Longitud de evaluación para mediciones de deflexión

Basándose en la información presentada en capítulos anteriores en cuanto a la longitud de la evaluación de deflexiones para el análisis de la capacidad estructural, se genera el siguiente cuadro resumen para intervalos de medición en evaluaciones a nivel de proyecto para pavimentos flexibles:

Tabla 2.22: Longitud entre mediciones de deflexión FWD.

País	Longitud entre puntos de medición[m]
Australia	10
Canadá	10 a 50
España	20
México	100 a 500
Perú	50 por pista alternada
Sudáfrica	50 a 100

Adicionalmente, estudios de la Federal Highway Administration (FHWA) concluyeron que una óptima manera de representar el estado de una sección de carretera era a través de deflexiones promedio de segmentos homogéneos, donde el espacio entre puntos de deflexión a nivel de proyecto corresponde a 0,1 mi (161 m) (Federal Highway Administration, 2012).

Considerando que se requiere un análisis a nivel de proyecto representativo del estado del pavimento, se propone una evaluación de deflectometría mas exigente que la vigente, a intervalos de al menos 50 m por pista. Este intervalo se ajusta a las recomendaciones o prácticas antes citadas, como la de Australia, Canadá y Sudáfrica, permitiendo mantener un seguimiento y control mas detallado de las secciones del pavimento.

Este intervalo entre mediciones se ajusta al Nivel 2 indicado por el Manual de Carreteras 8.502.5 Volumen 8, presentado en el capítulo 2.3.1.2 de este documento, recomendado para diseños de rehabilitación de pavimentos. Se adoptará esta longitud y nivel de evaluación para pavimentos rígidos y flexibles.

2.10.2. Frecuencia de medición de deflexión

Según la publicación "Simplified Techniques for Evaluation and Interpretation of Pavement Deflections for Network-Level Analysis" (Federal Highway Administration, 2012), la frecuencia recomendada depende de la "tasa de cambio" general de las condiciones estructurales a lo largo del tiempo:

- La tasa de cambio anual de las deflexiones del pavimento mostró poca correlación con los niveles de tránsito.
- La tasa de cambio anual de las deflexiones del pavimento mostró poca correlación con el tipo de subrasante.
- La tasa de variación anual de las deflexiones del pavimento mostró cierta correlación con el espesor de CA: los espesores más bajos produjeron mayores tasas de cambio.
- Los climas secos parecían producir cambios anuales más grandes en las deflexiones del pavimento.
- Una vez que se eliminaron las influencias de temperatura, la tasa de cambio de las mediciones de deflexión fue relativamente pequeña para la mayoría de las secciones de pavimento contenidas en la base de datos LTPP.

Con base al análisis de las secciones de pavimento consideradas para esta publicación, se recomiendan **5 años entre pruebas de FWD a nivel de red para pavimentos flexibles** (Federal Highway Administration, 2012).

Las recomendaciones indicadas por Austroads para evaluaciones a nivel de red en pavimentos flexibles se detallaron en 2.3.4.1, para autopistas o **carreteras principales con mucho tránsito sin deterioros** son de una frecuencia de prospecciones cada **3 a 5 años**.

Cabe destacar que las investigaciones de la FHWA y Austroads no están enfocadas a una evaluación a nivel de proyecto, por otro lado, en concesiones españolas y mexicanas se exige una evaluación de capacidad estructural cada dos y un año respectivamente o cuando se produzcan deterioros.

Las Bases de Licitaciones mencionadas en 2.3.3 indican realizar en forma periódica, cada 5 años, una medición de Deflectometría de Impacto, se recomienda entonces, disminuir la frecuencia al menor valor mencionado por Austroads para una evaluación a nivel de red, adoptando aquella frecuencia, cada 3 años, como la frecuencia de mínima de deflexiones a nivel de proyecto para el análisis estructural o cuando se produzcan deterioros.

Esta frecuencia se recomienda adoptar también para pavimentos rígidos, basado en opiniones expertas en evaluación de este tipo de pavimentos en el país.

2.10.3. Desarrollo de una calificación del nivel de servicio asociada al valor de deflexión

Para la generación de calificaciones según el nivel de desempeño asociado al valor de deflexiones, se distingue el desarrollo particular entre pavimentos flexibles y la cantidad de ejes equivalente de diseño y pavimentos rígidos, tal como se describe a continuación.

2.10.3.1. Desarrollo de una evaluación para Pavimentos Flexibles

Se utilizarán calificaciones categóricas que representarán estados del pavimento desde el "muy bueno" al "muy malo", cada una de las calificaciones representan valores de los indicadores seleccionados en 2.7.1 determinados según los estudios mencionados en 2.3.5 y de una sensorización en mediciones de deflexión en carreteras chilenas. Además de presentar valores para los indicadores, se hace distinción entre tres tipos de pavimento.

En el caso de la evaluación a la deflexión máxima D_0, se establecen valores diferenciados según el nivel de tránsito de diseño de la carretera según sean mayores o menores a 20 millones de ejes equivalentes. Los umbrales definidos para la calificación corresponden a valores de deflexiones normalizadas por humedad, temperatura y carga a 20°C y 50 kN respectivamente.

Tabla 2.23: Calificación para valores de deflexión máxima D_0 en carreteras con mayor a 20 millones de EE de diseño.

NIVELES DE DESEMPEÑO				
MUY BUENO	**BUENO**	**JUSTO**	**MALO**	**MUY MALO**
Rangos indicador D_0 [µm]				
Pavimento Base Granular				
≤200	]200;300]	]300;400]	]400;500]	>500
Pavimento Base Cementada				
≤125	]125;150]	]150;200]	]200;250]	>250
Pavimento Base Bituminosa				
≤200	]200;300]	]300;400]	]400;500]	>500

Tabla 2.24: Calificación para valores de deflexión máxima D_0 en carreteras con mayor a 10 y menor a 20 millones de EE de diseño.

NIVELES DE DESEMPEÑO				
MUY BUENO	**BUENO**	**JUSTO**	**MALO**	**MUY MALO**
Rangos indicador D_0 [µm]				
Pavimento Base Granular				
≤375	]375;450]	]450;500]	]500;600]	>600
Pavimento Base Cementada				
≤200	]225;250]	]225;250]	]250;450]	>450
Pavimento Base Bituminosa				
≤375	]375;450]	]450;500]	]500;600]	>600

Tabla 2.25: Calificación para valores de BLI.

NIVELES DE DESEMPEÑO				
MUY BUENO	**BUENO**	**JUSTO**	**MALO**	**MUY MALO**
Rangos indicador BLI [µm]				
Pavimento Base Granular				
≤50	]50;100]	]100;200]	]200;300]	>300
Pavimento Base Cementada				
≤25	]25;40]	]40;100]	]100;300]	>300
Pavimento Base Bituminosa				
≤50	]50;100]	]100;200]	]200;400]	>400

Tabla 2.26: Calificación para valores de MLI.

NIVELES DE DESEMPEÑO				
MUY BUENO	**BUENO**	**JUSTO**	**MALO**	**MUY MALO**
Rangos indicador MLI [µm]				
Pavimento Base Granular				
≤40	]40;70]	]70;100]	]100;200]	>200
Pavimento Base Cementada				
≤30	]30;40]	]40;60]	]60;100]	>100
Pavimento Base Bituminosa				
≤30	]30;65]	]65;100]	]100;150]	>150

Tabla 2.27: Calificación para valores de LLI.

NIVELES DE DESEMPEÑO				
MUY BUENO	**BUENO**	**JUSTO**	**MALO**	**MUY MALO**
Rangos indicador LLI [µm]				
Pavimento Base Granular				
≤30	]30;40]	]40;50]	]50;100]	>100
Pavimento Base Cementada				
≤30	30;35]	]35;40]	]40;80]	>80
Pavimento Base Bituminosa				
≤30	]30;40]	]40;50]	]50;80]	>80

Los valores utilizados para cada nivel de desempeño fue determinado por un análisis a la base de datos entregada por el Laboratorio Nacional de Vialidad en el seguimiento de carreteras chilenas, relacionando el estado de ellas con los valores de deflexión obtenidos al momento de realizar la auscultación.

2.10.3.2. Desarrollo de una evaluación para Pavimentos Rígidos

Se utilizarán calificaciones categóricas que representarán estados del pavimento desde el "muy bueno" al "muy malo", cada una de las calificaciones representan valores de los indicadores seleccionados en 2.6.2 determinados según los estudios mencionados en 2.3.5.

No se hace distinción entre juntas con y sin dispositivos de transferencia de carga, generando las siguientes exigencias:

Tabla 2.28: Calificación para eficiencia de transferencia de carga.

Porcentaje eficiencia de transferencia de carga				
MUY BUENO	**BUENO**	**JUSTO**	**MALO**	**MUY MALO**
≥90	]90;80]	]80;60]	]60;50]	>50

Los valores utilizados para cada nivel de desempeño fue determinado por un análisis a la base de datos generada por el IDIEM en el seguimiento de carreteras chilenas, relacionando el estado de ellas con los valores de la efciciencia de transferencia de carga, en conjunto con la opinión de expertos en el mantenimiento y rehabilitación de pavimentos de hormigón en Chile.

2.10.4. Metodología y equipo de medición

El equipo a utilizar corresponde a un deflectómetro de impacto FWD, mediante el cual se medirán las deflexiones que definen el cuenco a través de los sensores que se encuentran dispuestos a distancias especificadas radialmente. Se considerarán las deflexiones corregidas por humedad, temperatura y carga, según indique la normativa 8.502.5 Manual de Carreteras Volumen N°8 o recomendaciones vigentes.

El nivel de muestreo se clasificará como Nivel 2 según el MC-V8 8.502.5 del Manual de Carreteras, Volumen N°8.

Los ensayes deben realizarse e informarse al menos a intervalos de 50 m en cada pista en pavimentos asfálticos. Para concretos asfálticos y hormigones continuamente reforzados, como mínimo, la carga debe ubicarse a lo largo de la huella externa de la pista por evaluar o, alternativamente, a lo largo del eje de las losas continuamente reforzadas. Para hormigones simples con juntas, la carga debe ser ubicada en el centro de la losa y luego movida a la junta más cercana, generalmente al lado de salida. El ensaye de las juntas se debe llevar a cabo en la huella externa de la pista por evaluar. No todas las juntas asociadas a las losas interiores son ensayadas, sin embargo, el área mínima de muestreo consistirá en las primeras 15 losas cada 250 m o el equivalente tal que conformen al menos un 25 % del total de losas por cada kilómetro por pista. El kilómetro de inicio será definido de manera aleatoria, tal como se ilustra en la Figura

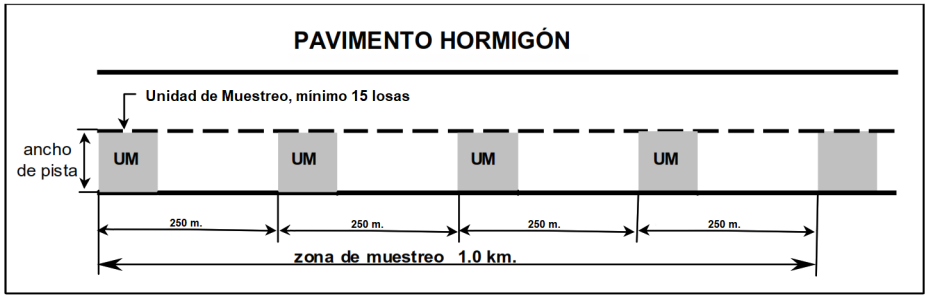


Figura 2.21: *Zona de muestreo pavimentos rígidos .*

Fuente: Elaboración Propia

Se informarán todas las mediciones de deflexión, se calcularán, compararán e informarán los indicadores D_0, BLI, MIL, LLI y TC % según sea el tipo de pavimento evaluado. Para el caso de la deflexión D_0 y TC %, el Concesionario deberá cumplir con la evaluación en base a los criterios entregados en 2.10.3.

Para el inicio de la explotación (recepción de la construcción) se exigirá al Concesionario deflexiones D_0 y TC % al menos del carácter "bueno" según lo establecido en 2.10.3. Para el fin de la etapa de explotación se exigirá al Concesionario deflexiones D_0 y TC % al menos del carácter "justo" según lo establecido en 2.10.3.

La evaluación (nota) del indicador D_0 y TC % para el **inicio de la etapa de explotación**, se hará según la Tabla 2.29:

Tabla 2.29: Calificación del indicador D_0 o TC % para la recepción de la construcción.

		Porcentaje del total de mediciones puntuales de D_0 o TC% dentro de cada rango				
		Muy Bueno	Bueno	Justo	Malo	Muy malo
Calificación del indicador durante etapa de explotación	Muy Bueno	≥ 50	< 50	≤5	≤1	= 0
	Bueno	< 50	≥ 50	≤5	≤1	= 0
	Justo	≥ 50		< 50	≤1	= 0
	Malo	-			≤5	= 0
	Muy malo	-			>5	= 0
		-				>0

La evaluación (nota) del indicador D_0 y TC % **durante la etapa de explotación**, se hará según Tabla 2.30

Tabla 2.30: Calificación del indicador D_0 o TC % para fase de explotación.

		Porcentaje del total de mediciones puntuales de D_0 o TC% dentro de cada rango				
		Muy Bueno	Bueno	Justo	Malo	Muy malo
Calificación del indicador recepción de la obra	Muy Bueno	≥ 50	< 50		≤5	≤2
	Bueno	≥ 50		< 50	≤5	≤2
	Justo	-			≤5	≤2
	Malo	-			≤10	≤2
	Muy malo	-			>10	≤2
		-				>2

La incorporación de este sistema de evaluación por categorías, se introduce para complementar y mejorar lo presentado en la últimas Bases de Licitación, disminuyendo el intervalo de tiempo entre las mediciones de deflectometría, proporcionando además, una metodología clara para su desarrollo y evaluación, para pavimentos flexibles y rígidos, ya que, como pudo ser verificado anteriormente, en las Bases de Licitación de presentarse el tema de capacidad estructural, sólo indicaban antecedentes de su medición, mas no una evaluación del resultado de la misma.

2.10.4.1. Localización de geófonos

Basado en las indicaciones otorgadas en "LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements" (Federal Highway Administration, 2006), se debe mantener la misma ubicación de los geófonos del FWD. Medir la distancia de cada geófono desde el centro de la placa de carga hasta el centro del soporte del geófono. Los desplazamientos delante de la placa de carga (es decir, en la dirección del enganche) se consideran positivos. Las distancias necesarias para equipos con 7 o 9 sensores se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 2.31: Adaptado de Tabla 1, distancias para sensores de deflexión para FWDs de nueve sensores.

Sensor de deflexión	Sensor de deflexión	Distancias [mm]
D1	D_0	0
D2	D_{200}	203
D3	D_{300}	305
D4	D_{450}	457
D5	D_{600}	610
D6	D_{900}	914
D7	D_{1200}	1.219
D8	D_{1500}	1.524
D9	D_{-300}	-305

Tabla 2.32: Adaptado de Tabla 2, distancias para sensores de deflexión en FWDs de 7 sensores.

Sensor de deflexión	Sensor de deflexión	Distancias [mm]
D1	D_0	0
D2	D_{200}	203
D3	D_{300}	305
D4	D_{450}	457
D5	D_{600}	610
D6	D_{900}	914
D7	D_{1200}	1.219
D8	D_{1500}	1.524
D9	D_{-300}	-305

2.10.4.2. Unidades

Basado en las indicaciones otorgadas en "LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements" (Federal Highway Administration, 2006), todos los datos recopilados deben estar en unidades del Sistema Internacional (SI). La temperatura debe registrarse y mostrarse en grados Celsius (C), la carga en kilonewtons (kN), deflexión en micrómetros (μm) y distancia del sensor de deflexiones en milímetros (mm).

Capítulo 3

PARADEROS

3.1. Introducción

Para el activo de paraderos en carreteras concesionadas, el Manual de Carreteras ofrece criterios de diseño, más no posee una guía para su seguimiento o mantenimiento. Cada proyecto concecionado posee las exigencias que se pensaron pertinentes a cada uno de ellos en lo que respecta a la calidad de su serviciabilidad, por lo que es posible encontrar diversas maneras de calificarlo junto a otros elementos de la infraestructura vial a lo largo de las diferentes concesiones ya realizadas o que están aun vigentes en el país.

El propósito de esta investigación es definir una pauta de exigencias que permitan una evaluación del nivel de servicio prestado por los paraderos tanto en su integridad como en la funcionalidad definiendo exigencias propias a cumplir para este activo en particular. La importancia de este activo ha motivado su estudio de manera diferenciada de otros elementos viales como plazas de peaje y pesaje, pasarelas peatonales, área de pasos inferiores, sistemas de drenaje y saneamiento, entre otros, con los que suele agruparse y definir en términos generales las condiciones de su funcionamiento.

Se presenta una propuesta que incluye la revisión del estado actual de los contratos de concesiones e investigaciones internacionales que ofrecen estándares de lo que debe poseer un paradero para su buena preservación.

3.2. Revisión Bibliográfica

Austroads (2015). Guide to Road Design Part 6B: Roadside Environment, Australia.
Contiene información sobre los componentes de las áreas aledañas al camino que pueden necesitar ser acomodadas dentro de una concesión vial. Estos componentes incluyen aspectos ambientales como la gestión de la fauna, el control del ruido y el paisajismo, el mobiliario de las carreteras como letreros, postes, cercas e iluminación. También hay información sobre el estacionamiento fuera de la calle y la ubicación y asignación de espacio para los servicios públicos.

Federal Highway Administration (2008). Pedestrian Safety Guide for Transit Agencies. Estados Unidos
Proporciona recursos fáciles de implementar para mejorar la seguridad de los peatones. La guía incluye una variedad de enfoques para abordar problemas comunes de seguridad peatonal que probablemente surjan cerca de las estaciones de tránsito, paradas de autobuses y otros lugares donde opera el tránsito de autobús o ferrocarril.

Ministerio de Obras Públicas. Bases de Licitación Concesiones Ruta 43 (2012), Ruta 5 tramo Los Vilos - La Serena (2018) y Ruta G-21 (2018). Chile
Contienen las bases administrativas, técnicas y económicas que regirán las concesiones para la ejecución, reparación, conservación y explotación de la obra pública fiscal; el uso y goce sobre bienes nacionales de uso público o fiscales, destinados a desarrollar la obra entregada en concesión y las áreas de servicios que se convengan.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2018). Licitación Pública Internacional Número APP-009000959-E12-2018. México.
Modelo de contrato de prestación de servicios para la conservación de carretera en términos de la Ley de Asociaciones Público - Privadas según estándares de desempeño.

Transportation Research Board of the National Academies (1996). TCRP Report 19: Guidelines for the Location and Design of Bus Stops. Estados Unidos
Esta investigación desarrolla pautas para ubicar y diseñar paradas de autobuses en diversos entornos. Estas ayudarán a las agencias de tránsito u otros organismos públicos a ubicar y diseñar paradas de autobuses que consideren la conveniencia, seguridad y acceso de los usuarios de los autobuses, así como las operaciones de tránsito seguro y el flujo de tránsito. Las pautas incluyen información sobre la ubicación y el diseño de paradas de autobús y las listas de verificación de los factores que deben considerarse.

3.3. Revisión de literatura referida a Paraderos en carreteras

Para conocer el estado de la práctica del seguimiento de las instalaciones de los paraderos, se revisa la literatura nacional, encontrando especificaciones dedicadas a este activo en contratos de carreteras concesionadas existentes, como también en literatura internacional en concesiones mexicanas. En el ámbito internacional, existen estudios australianos y estadounidenses que entregan parámetros a considerar sobre un correcto funcionamiento de paraderos.

3.3.1. Especificaciones del servicio de los paraderos en carreteras concesionadas en Chile

De la revisión de las últimas versiones de Bases de Licitación de obras viales concesionadas de los años 2012, 2015, 2017 y 2018, se hace referencia a Paraderos de Buses en etapa de explotación en los siguientes casos:

3.3.1.1. Concesión para el Mejoramiento y Conservación de la Ruta 43 de la Región de Coquimbo (Ministerio de Obras Públicas, 2012)

Ubicada en la región de Coquimbo, la Ruta 43 se emplaza en las provincias del Elqui y Limarí. Conecta la ciudad de Ovalle con la ciudad de Coquimbo. El proyecto contempla 86 km de caminos pavimentados, además de la construcción de aceras, ciclovías, paisajismo e iluminación cuyos beneficios comprometen aumento de la seguridad vial, ahorros en tiempos de viajes y costos operacionales.

De la sección "ANEXO 5: ESTÁNDARES DE RESULTADO N°5 DE INSTALACIONES" (Ministerio de Obras Públicas, 2012) en lo que respecta a paraderos se extrae lo siquiente:

Las instalaciones deben estar funcionales o su funcionalidad debe ser restaurada dentro del plazo de restauración establecido en esta ficha, en cada SHm (Sector Hectométrico) y durante toda la etapa de explotación. Para cada SHm se debe informar al MOP el resultado de comparar el estado del indicador de resultado con el umbral dentro del intervalo máximo entre declaraciones establecido en esta ficha .

Consideraciones respecto a instalaciones de paraderos:

1. En cada SHm los objetos a evaluar serán los siguientes: dispositivos como [...], paraderos, [...], islas de resguardo para peatones.
2. Se debe considerar que el indicador de resultado "funcionalidad de instalaciones" de un SHm de camino están en estado de cumplimiento sólo si todos los objetos a evaluar contenidos en dicho SHm están funcionales.

3. Se considerará que los paraderos a evaluar están funcionales sólo si se cumplen copulativamente las siguientes condiciones:

   a) Los dispositivos están en buenas condiciones, de tal forma que su utilización sea cómoda y segura para los propósitos y modos de uso para los que fueron diseñados. Los dispositivos deben mantener todos sus elementos en buen estado de funcionamiento, limpios y sin malos olores.

   b) Las islas de resguardo para peatones tienen su superficie libre de baches, deformaciones y cualquier irregularidad que altere una superficie adecuada para el tránsito cómodo y seguro del peatón. Las soleras que definen las islas están sin daños, con sus junturas selladas y en la posición correcta.

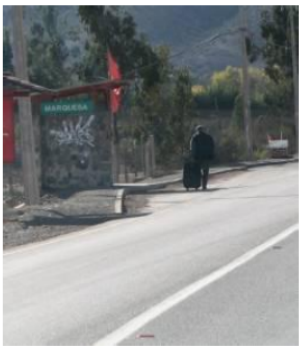
   c) Los paraderos están limpios, con su pintura en buen estado y los elementos estructurales y de resguardo en buen estado.

Método de constatación del estado del indicador de resultado para paraderos:

1. Respecto de los dispositivos, su buena condición, el buen estado de sus elementos y su limpieza se constatará mediante inspección visual.
2. Los olores se constatarán mediante inspección olfativa.
3. En particular, para islas, paraderos y pasarelas, se constatará mediante inspección visual.

Tabla 3.1: Ficha de instalaciones base licitación Ruta 43

Indicador de resultado	Funcionalidad de instalaciones
Umbral	Funcional
Plazo de restauración	7 días
Intervalo máximo entre declaraciones	30 días
Unidad de constatación	SHm
Período de contabilización	1 día



3.3.1.2. Concesión Vial Mejoramiento Ruta G-21 (Ministerio de Obras Públicas, 2017)

De la sección "2.4.1.1 PLAN DE CONSERVACIÓN DE LAS OBRAS":

"El objetivo principal que persigue la formulación de un Plan de Conservación de las Obras para el sector del proyecto que entrará en servicio, es mantener en buen estado la estructura de las calzadas, su superficie de rodadura, bermas, puentes y estructuras, señalización, demarcación y seguridad, equipamiento, sistema de drenaje y saneamiento, paisajismo, sistema de iluminación, instalaciones, obras complementarias y las obras anexas y, en general, **todos los elementos que forman parte del Área de Concesión, para garantizar las adecuadas condiciones de seguridad, operación y confort de las vías.** En este sentido, la Sociedad Concesionaria deberá adoptar en la elaboración y ejecución de dichos Planes, los criterios y normas técnicas que le permitan asegurar en todo momento y por el período que dure la Concesión, que se cumpla el objetivo planteado y, que al final de la Concesión, se entregue una obra en condiciones de seguir siendo usada de acuerdo a las exigencias establecidas en las presentes Bases de Licitación.

La presentación de los Planes de Conservación de las Obras deberán ajustarse en cuanto a su forma y contenido, a lo señalado en el "Instructivo para el Ordenamiento y la Formulación de los Planes y Programas de Conservación en Contratos de Concesión Vial", versión vigente, desarrollado por la Dirección General de Obras Públicas y, además, deberán abarcar todas las obras o elementos que forman parte del Área de Concesión.

En consecuencia, la Sociedad Concesionaria deberá ajustar su Programa Anual de Conservación señalado en el artículo 2.4.1.2 de las presentes Bases de Licitación, a las estipulaciones detalladas en la versión vigente del instructivo mencionado, sin que esto implique el pago de compensaciones a la Sociedad Concesionaria.

Este Plan deberá desagregarse por tipo de obras (vías, puentes y estructuras, **paraderos de buses**, cercos, entre otros).

Sin perjuicio de lo anterior, cada Plan de Conservación de las Obras deberá incluir, como mínimo, lo siguiente:

1. Políticas de conservación con justificación técnica y actividades de conservación a ejecutar, cumpliendo con lo señalado en las presentes Bases de Licitación.
2. Plan de Autocontrol y Seguimiento de Gestión de la Calidad conforme a lo establecido en los artículos 1.10.12 y 2.4.9.2 de las presentes Bases de Licitación.
3. Inventario de explotación incorporado al Sistema BIM, a que se refiere el artículo 1.9.1.3 de las presentes Bases de Licitación."

3.3.1.3. Concesión Ruta 5 Tramo Los Vilos – La Serena (Ministerio de Obras Públicas, 2018)

Si bien no hace mención explícita de la mantención y conservación de paraderos, éste ítem repasa de manera general el estado de áreas de servicios generales, "sección 2.4.3.1.8 CONSERVACIÓN DE LAS ÁREAS DE SERVICIOS GENERALES, ÁREAS DE ATENCIÓN DE EMERGENCIAS, MIRADORES Y PLAZA DE PESAJE":

El Concesionario dispondrá de los recursos necesarios para mantener las **Áreas de Servicios Generales**, las Áreas de Atención de Emergencias, Miradores y Plaza de Pesaje con una adecuada conservación de todos sus elementos constitutivos, sin ser taxativo, al menos debe cumplir con las siguientes exigencias:

a) La señalética propia de estas instalaciones, distinta a aquella considerada como elementos de seguridad, conforme lo establecido en el artículo 2.4.3.2.3 de las presentes Bases de Licitación, debe estar presente, limpia, sin rayas y legible.

b) **Las pinturas de las instalaciones no deben presentar manchas, rayas ni descascaramientos.**

c) Las techumbres deben estar íntegras y funcionales.

d) Los vidrios y ventanas deben permanecer limpios, sin roturas y completamente funcionales.

e) Las oficinas anexas deben presentarse limpias, equipadas, pintadas y con todos sus elementos funcionales.

f) Servicios higiénicos deberán estar siempre limpios y sin malos olores, con presencia de todos sus artículos de higiene (papel higiénico, jabón, toallas de papel), suministros básicos (agua potable, electricidad) operativos y con equipamiento (espejos, secadores de mano, papeleros, etc.).

g) **Los terrenos donde se emplazarán las Áreas de Servicios Generales, las Áreas de Atención de Emergencias, Miradores y Plaza de Pesaje, deberán permanecer limpios, sin basuras, desechos, residuos, escombros y sin malos olores.**

h) El uso de estas instalaciones debe ser cómodo y seguro para cumplir con el propósito para el cual fue diseñada.

i) En estas instalaciones la Sociedad Concesionaria deberá disponer de basureros diferenciados por tipo de basura.

j) Las bancas, toldos, juegos infantiles presentes en estas áreas, deberán estar íntegros, funcionales, pintados, sin manchas ni rayas, sin óxido.

[...] **Cuando se detecte el incumplimiento de cualquiera de las exigencias establecidas en las letras a), b), c), d), e), g), h), i) y j) el Concesionario dispondrá de 3 (tres) días**

para subsanar el (los) incumplimiento(s). En el caso de incumplimiento por parte de la Sociedad Concesionaria de cualquiera de estas exigencias establecidas en el presente artículo, una vez vencido el plazo para subsanar los incumplimientos, hará incurrir a ésta en la multa que se establezca según el artículo 1.8.11 de las presentes Bases de Licitación.

Sin perjuicio de lo anterior, para efectuar las adecuadas labores de conservación, la Sociedad Concesionaria deberá presentar dentro de su Plan de Conservación de las Obras y Programa de Conservación de Obras señaladas en el artículo 1.10.5 de las presentes Bases de Licitación, las frecuencias mínimas de actividades indicadas en la Tabla 3.2 siguiente:

Tabla 3.2: Programación para la conservación de las áreas de servicios generales, áreas de atención de emergencias, miradores y plaza de pesaje.

Operación	Frecuencia
Retiro de residuos sólidos	Diariamente
Limpieza de instalaciones	4 veces al día
Pintura exterior e interior	1 vez al año
Fumigación, sanitización y desratización	4 veces al año
Revisión de alumbrado interior y exterior	2 veces al mes
Revisión y mantenimiento de sistema de tratamiento aguas servidas	1 vez al mes
Reposición de elementos afectados, deteriorados, defectuosos o extraviados	Cada vez que suceda con un plazo de 15 días

Las frecuencias de operación indicadas en la tabla anterior, para la conservación de la Áreas de Servicios Generales, de las Áreas de Atención de Emergencias, Miradores y Plaza de Pesaje corresponden a frecuencias mínimas. En caso que el Inspector Fiscal detecte la necesidad de modificar las labores y frecuencias indicadas anteriormente en la programación establecida, instruirá al Concesionario mediante una anotación en el Libro de Explotación de la Obra las labores a realizar y el plazo en que se desarrollarán, debiendo el Concesionario ejecutarlas a su entero cargo, costo y responsabilidad.

3.3.2. Especificaciones de paraderos en carreteras concesionadas a nivel internacional

Realizada una revisión en bases de licitación en países como Argentina, Bolivia, Colombia, Costa Rica, España, México y Perú, cuyo seguimiento del mantenimiento de las carreteras son evaluados por niveles de servicio, las instalaciones de paraderos no están contempladas dentro de las responsabilidades del concesionario a excepción de México.

3.3.2.1. Especificaciones del servicio de los paraderos en carreteras concesionadas en México

Extraído del contrato denominado "Licitación Pública Internacional Número APP-009000959-E12-2018" (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2018), se resume la metodología aplicada para el seguimiento y evaluación de los paraderos en carreteras concesionadas.

La forma y frecuencia de inspección corresponde a una inspección visual diaria y detallada en los meses de junio y diciembre de cada año. Se deberán mantener siempre limpios, pintados y en buen estado. El tiempo máximo de respuesta correctiva será como máximo de 2 días.

Método de Cálculo de la Deducción Mensual por Incumplimiento en el Estándar por Segmento

Tabla 3.3: Método de cálculo de la deducción mensual.

Concepto	% de Corrección Deductiva
% de corrección deductiva por no solventarse en tiempo correctivo	3,50%
% de corrección deductiva por cada tiempo correctivo adicional	5,00%

Se considerará que se ha incurrido en deducción si no se cumple con el Tiempo Máximo de Respuesta Correctiva. Se considera un evento a:

$$Paraderos = \frac{\sum paraderos\,con\,incumplimientos\,del\,segmento\,en\,evaluación}{número\,total\,de\,paraderos\,del\,segmento} \tag{3.3.1}$$

En caso de que se encuentre invadido el Derecho de Vía, el Desarrollador tendrá la obligación de informar al Gerente Supervisor de esta situación, mismo que en coordinación con la Dependencia analizarán y tomarán las decisiones pertinentes, que serán comunicadas al Desarrollador mediante oficio respectivo, en cuyo caso, la Dependencia informará al Desarrollador si queda exento o no del cumplimiento de este Estándar en la porción del derecho de vía afectada hasta resolución por parte de la propia Dependencia, a partir de lo cual se deberá atener al tiempo máximo de respuesta correctiva.

3.3.3. Estudios Internacionales

La revisión de literatura internacional arrojó resultados en publicaciones de Australia y de agencias de Estados Unidos, con recomendaciones sobre el diseño de las instalaciones y del mantenimiento de ellas.

3.3.3.1. Guide to Road Design Part 6B: Roadside Environment (Austroads, 2015b).

Se debe considerar una cerca apropiada para el sitio y el medio ambiente a lo largo de todo el límite entre una carretera y una parada de autobuses con el fin de controlar el movimiento peatonal.

El criterio de ingeniería debe guiar la necesidad de una cerca y el tipo de cerca requerida (por ejemplo, las áreas con barreras naturales pueden no requerir una cerca).

La autoridad y el operador del transporte público relevante deben ser consultados.

3.3.3.2. Pedestrian Safety Guide for Transit Agencies (Federal Highway Administration, 2008).

Como herramientas de evaluación de parada de autobús se consideran las listas de verificación de parada de autobús: Las listas de verificación de parada de autobús se utilizan comúnmente para inventariar las paradas de autobús y las características de la carretera en el área que rodea una parada. Pueden ser utilizados por las agencias de tránsito para evaluar sus propias instalaciones o por los residentes locales para evaluar las condiciones en las paradas de autobús. Estas listas de verificación suelen documentar:

- Presencia y condición de la acera cerca de la parada del autobús.
- Tratamientos de cruce de caminos cerca de la parada del autobús (pasos peatonales, señales peatonales, botones peatonales, sincronización de la señal peatonal, señales de advertencia audibles).
- Ruta de acceso entre la acera y el área de embarque de la parada de autobús.
- Legibilidad de las señales de parada de autobús.
- Obstrucciones en la parada del autobús.
- Refugios y asientos para paradas de autobús.

3.3.3.3. Guidelines for the Location and Design of Bus Stops (Transportation Research Board of the National Academies, 1996).

En cuanto a temas cuya responsabilidad es del Concesionario, se distinguen los siguientes puntos:

Línea de visión

La parada de autobús debe ser claramente visible por razones de seguridad y protección. Las paradas ocultas por las estructuras existentes o la vegetación son difíciles de ver para los conductores. Los vehículos que pasan pueden no estar conscientes de la presencia de peatones cerca o en la carretera; esto aumenta la posibilidad de que ocurran accidentes. El sitio de la parada de autobús debe ser inspeccionado cuidadosamente para detectar posibles problemas relacionados con la vista.

Por razones de seguridad, se deben preservar las líneas de visión para mantener la vigilancia directa e indirecta de la parada de autobús. El paisajismo, muros, paneles publicitarios y las estructuras pueden restringir la línea de visión y proporcionar espacios para esconderse. Las paradas de autobús se deben ver fácilmente desde los terrenos cercanos y el tránsito que pasa para mejorar la seguridad de la parada.

Mantenimiento

El mantenimiento adecuado de las instalaciones de autobuses es crucial para preservar una imagen positiva de un sistema de tránsito. La basura y el grafiti deben eliminarse lo antes posible para evitar una mayor degradación de las instalaciones. Se puede crear una base de datos que contenga programas de mantenimiento para rastrear el estado de las instalaciones, incluidas las condiciones de la superficie del pavimento; edad de las instalaciones; historial del daño; y la condición del refugio, bancos u otros servicios de tránsito.

El mantenimiento de las paradas de autobús puede ser costoso y requerir mucho tiempo. Los acuerdos de trabajo con empresas locales pueden reducir las responsabilidades financieras de la agencia de tránsito. Para las paradas junto a empresas de conveniencia, la agencia de transporte debe tratar de obtener un acuerdo de trabajo con las empresas locales para proporcionar la eliminación de basura y el mantenimiento general en la parada de autobús. Esto debe incluir la remoción de nieve.

3.4. Indicadores técnicos para evaluar paraderos

Se recopila una serie de indicadores para evaluar el servicio prestado por los paraderos desde la literatura descrita anteriormente.

3.4.1. Porcentaje mensual por incumplimiento de exigencias de los paraderos

Especificaciones mexicanas en contratos de carreteras concesionadas, utilizan la metodología por incumplimiento del estándar por segmentos de la carretera, se basa en evaluaciones del tipo porcentual del número de paraderos con algún incumplimiento:

$$\%Incumplimiento\,Paraderos = \frac{\sum paraderos\,con\,incumplimientos\,del\,segmento\,en\,evaluación}{número\,total\,de\,paraderos\,del\,segmento} \tag{3.4.2}$$

3.4.2. Porcentaje mensual por cumplimiento de exigencias de los paraderos

Esta metodología de evaluar es un "indicador tipo" utilizado en la Base de Licitación de la Concesión Nogales - Puchuncaví (Ministerio de Obras Públicas, 2015), este contrato no hace mención al seguimiento de las instalaciones de paraderos, pero se desarrolla a continuación su adaptación:

$$PAR_m = \frac{\sum_{i=1}^{d} \sum_{j=i}^{n} E_{i,j}}{n * d} \tag{3.4.3}$$

Donde:

PAR_m	: Porcentaje mensual de cumplimiento de exigencias de paraderos.
$E_{i,j}$	: Corresponde al valor adoptado por las exigencias, para el paradero "j", en el día "i".
i	: Es el sub índice que representa el contador de los días del mes.
j	: Es el sub índice que representa el contador de los paraderos.
d	: Número total de días del mes.
n	: Número total de paraderos.

El valor de $E_{i,j}$ adoptará el valor 1 cuando se cumplan copulativamente todas las exigencias del paradero, y 0 en caso contrario. Asimismo, cuando alguna de las exigencias se encuentre en incumplimiento, si se resuelve dentro del período de restauración, para los efectos de la determinación del indicador, las exigencias se han cumplido.

3.4.3. Número de incumplimientos mensuales de las exigencias de los paraderos

Esta metodología es un adaptado del "indicador tipo" utilizado en la Base de Licitación de la Concesión Nogales - Puchuncaví (Ministerio de Obras Públicas, 2015), la diferencia es que se contabiliza directamente el número de inclumplimientos:

$$PAR_m = \sum_{i=1}^{d} \sum_{j=i}^{n} I_{i,j} \tag{3.4.4}$$

Donde:

PAR_m : Número de incumplimientos mensuales de las exigencias de los paraderos.
$I_{i,j}$: Corresponde al valor adoptado por el incumplimiento de las exigencias, para el paradero "j", en el día "i".
i : Es el sub índice que representa el contador de los días del mes.
j : Es el sub índice que representa el contador de los paraderos.
d : Número total de días del mes.
n : Número total de paraderos.

El valor de $I_{i,j}$ adoptará el valor 0 cuando se cumplan copulativamente todas las exigencias del paradero, y 1 en caso contrario. Asimismo, cuando alguna de las exigencias se encuentre en incumplimiento, si se resuelve dentro del período de restauración, para los efectos de la determinación del indicador, las exigencias se han cumplido.

3.5. Propuesta de procedimiento de análisis de paraderos para carreteras concesionadas en Chile

Para generar una propuesta de procedimiento de análisis de paraderos para carreteras concesionadas en Chile, se realizó la búsqueda de investigaciones, manuales y especificaciones para cada aspecto de interés en el seguimiento de los paraderos para definir de manera objetiva la metodología a seguir y ser incorporada a las nuevas concesiones.

3.5.1. Metodología y forma de medición

Se desarrolla una metodología de evaluación que inspeccionará aspectos de funcionalidad e integridad, a continuación, se detalla cada uno de ellos.

3.5.1.1. Funcionalidad de Paraderos

Frecuencia de medición
El período de contabilización será diario (cada un día). Debe realizarse al menos una medición mensual. No obstante, el Inspector Fiscal puede solicitar información con la periodicidad o en el momento que estime conveniente, además de realizar inspecciones no programadas en caso de reclamos y/o notificaciones de los usuarios.

Metodología
Todos los paraderos deben estar funcionales o su funcionalidad debe ser remendada dentro del plazo de restauración establecido y durante toda la etapa de explotación.

Se considerará que los objetos a evaluar están funcionales sólo si se cumplen copulativamente las siguientes condiciones:

1. Paraderos limpios.
2. Paraderos sin malos olores.
3. Accesos están libres de cualquier elemento extraño que altere la circulación de los peatones. Esto debe incluir la remoción de nieve.

Plazo de restauración
Cuando se detecte el incumplimiento de cualquiera de las exigencias establecidas, el Concesionario dispondrá de 1 (un) día para subsanar el (los) incumplimiento(s).

Método de constatación del estado del indicador de resultado
La limpieza y buena accesibilidad se constatará mediante inspección visual. Los olores se constatarán mediante inspección olfativa.

3.5.1.2. Integridad de Paraderos

Frecuencia de medición
El período de contabilización será diario (cada un día). Debe realizarse al menos una medición mensual. No obstante, el Inspector Fiscal puede solicitar información con la periodicidad o en el momento que estime conveniente, además de realizar inspecciones no programadas en caso de reclamos y/o notificaciones de los usuarios.

Metodología
Todos los paraderos deben estar íntegros o su integridad debe ser remendada dentro del plazo de restauración establecido y durante toda la etapa de explotación.

Se considerará que los objetos a evaluar están íntegros sólo si se cumplen copulativamente las siguientes condiciones:

1. Soleras sin daños, con sus junturas selladas y en la posición correcta.
2. Los paraderos están con sus elementos estructurales en buen estado. Elementos de hormigón sanos, sin fierro a la vista y sin grietas no selladas ni trozos faltantes.
3. Las zonas de resguardo para peatones en buen estado, tienen su superficie libre de baches, deformaciones y cualquier irregularidad que altere una superficie adecuada para el tránsito cómodo y seguro del peatón.
4. Los paraderos están con su pintura en buen estado, sin rayados.

Plazo de restauración
Las exigencias establecidas en el inciso anterior en los puntos 1. 2. y 3. deben estar siempre en cumplimiento. Cuando se detecte el incumplimiento establecido en el punto 4., el Concesionario dispondrá de 7 (siete) días para subsanar el incumplimiento. En caso de algún hecho fortuito, accidente u otro evento (actos vandálicos, hurtos, desastre natural) que requiera la reposición de alguna instalación, el plazo será de hasta 14 (catorce) días según criterio del Inspector Fiscal.

Método de constatación del estado del indicador de resultado
La buena condición y estado de los elementos de paraderos se constatará mediante inspección visual.

3.5.2. Desarrollo de una calificación del nivel de servicio asociada a paraderos

Se presentan dos modelos de evaluación de los paraderos de una carretera concesionada, el primero de ellos calificando por separado la funcionalidad e integridad de las instalaciones y el segundo realizando la evaluación en conjunto para ambos parámetros.

3.5.2.1. Funcionalidad de Paraderos

Se define el indicador de número de incumplimientos mensuales de funcionalidad de los paraderos:

$$PAR_{fun} = \sum_{i=1}^{d} \sum_{j=i}^{n} I_{i,j} \tag{3.5.5}$$

Donde:

PAR_{fun} : Número de incumplimientos mensuales de funcionalidad de los paraderos.
$I_{i,j}$: Corresponde al valor de los incumplimientos de funcionalidad, para el paradero "j", en el día "i".
i : Es el sub índice que representa el contador de los días del mes.
j : Es el sub índice que representa el contador de los paraderos.
d : Número total de días del mes.
n : Número total de paraderos.

El valor de $I_{i,j}$ adoptará el valor 0 cuando se cumplan copulativamente todas las exigencias de funcionalidad, y 1 en caso contrario. Asimismo, cuando alguna de las exigencias se encuentre en incumplimiento, si se resuelve dentro del período de restauración, para los efectos de la determinación del indicador, las exigencias se han cumplido.

Se determina la siguiente tabla de calificación para evaluar el desempeño de la funcionalidad de los paraderos en base al resultado del indicador PAR_{fun}:

Tabla 3.4: Calificación por nivel de desempeño para resultados del indicador funcionalidad de paraderos.

	NIVELES DE DESEMPEÑO				
	MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
N° de paraderos concesionados	**Número de incumplimientos mensuales de funcionalidad de paraderos** [paradero/día]				
≤40	0	1	2	3	≥4
]40;80]	0	[1;2]	[3;4]	[5;6]	≥7
>80	0	[1;3]	[4;6]	[7;9]	≥10

3.5.2.2. Integridad de Paraderos

Se define el indicador de número de incumplimientos mensuales de integridad de los paraderos:

$$PAR_{int} = \sum_{i=1}^{d} \sum_{j=i}^{n} I_{i,j} \tag{3.5.6}$$

Donde:

PAR_{int} : Número de incumplimientos mensuales de integridad de los paraderos.
$I_{i,j}$: Corresponde al valor de incumplimientos de integridad, para el paradero "j", en el día "i".
i : Es el sub índice que representa el contador de los días del mes.
j : Es el sub índice que representa el contador de los paraderos.
d : Número total de días del mes.
n : Número total de paraderos.

El valor de $I_{i,j}$ adoptará el valor 0 cuando se cumplan copulativamente todas las exigencias de funcionalidad, y 1 en caso contrario. Asimismo, cuando alguna de las exigencias se encuentre en incumplimiento, si se resuelve dentro del período de restauración, para los efectos de la determinación del indicador, las exigencias se han cumplido.

Se determina la siguiente tabla de calificación para evaluar el desempeño de la integridad de los paraderos en base al resultado del indicador PAR_{int}:

Tabla 3.5: Calificación por nivel de desempeño para resultados del indicador integridad de paraderos.

	NIVELES DE DESEMPEÑO				
	MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
N° de paraderos concesionados	Número de incumplimientos mensuales de integridad de paraderos [paradero/día]				
≤40	0	1	2	3	≥4
]40;80]	0	[1;2]	[3;4]	[5;6]	≥7
>80	0	[1;3]	[4;6]	[7;9]	≥10

3.5.2.3. Funcionalidad e Integridad de Paraderos

Se define el indicador de número de incumplimientos mensuales de funcionalidad e integridad de los paraderos:

$$PAR = \sum_{i=1}^{d} \sum_{j=i}^{n} I_{i,j} \tag{3.5.7}$$

Donde:

PAR : Número de incumplimientos mensuales de funcionalidad e/o integridad de los paraderos.
$I_{i,j}$: Corresponde al valor de incumplimientos de funcionalidad e/o integridad, para el paradero "j", en el día "i".
i : Es el sub índice que representa el contador de los días del mes.
j : Es el sub índice que representa el contador de los paraderos.
d : Número total de días del mes.
n : Número total de paraderos.

El valor de $I_{i,j}$ adoptará el valor 0 cuando se cumplan copulativamente todas las exigencias de funcionalidad e integridad, y 1 en caso contrario. Asimismo, cuando alguna de las exigencias se encuentre en incumplimiento, si se resuelve dentro del período de restauración, para los efectos de la determinación del indicador, las exigencias se han cumplido.

Se determina la siguiente tabla de calificación para evaluar el desempeño de la integridad de los paraderos en base el resultado del indicador PAR:

Tabla 3.6: Calificación por nivel de desempeño para resultados del indicador funcionalidad e integridad de paraderos.

	NIVELES DE DESEMPEÑO				
	MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
N° de paraderos concesionados	**Número de incumplimientos mensuales de funcionalidad e integridad de paraderos** [paradero/día]				
≤40	0	1	2	3	≥4
]40;80]	0	[1;2]	[3;4]	[5;6]	≥7
>80	0	[1;3]	[4;6]	[7;9]	≥10

Como pudo ser verificado de la revisión de las últimas Bases de Licitación chilenas, en alguna de ellas existía un sistema de evaluación para las instalaciones de paraderos o bien se hacía referencia a las garantías para su buen estado. Con la nueva propuesta se pretende unificar y complementar las exigencias incorporándolas a este nuevo sistema de evaluación por categorías, de manera que pueda ser caracterizado su nivel de desempeño. Además, se entregó una metodología para el desarrollo de las inspecciones y una nueva forma de evaluación independizándose del hectómetro.

Capítulo 4

VIBRACIONES

4.1. Introducción

Las irregularidades en el pavimento sumadas a una velocidad vehicular lo suficientemente alta puede inducir a la generación de frecuencias que coincidan con la frecuencia natural del mismo vehículo o el suelo, provocando vibraciones sustanciales que podrían ser de interés de estudio y control ante poblaciones o contrucciones próximas a una carretera.

El objeto de estudio de las vibraciones cuya fuente es el tránsito de una carretera concesionada es evaluar los efectos de éstas sobre la comunidad aledaña, que pueden causar molestias, fatiga y manifestarse como un fenómeno destructivo.

Con la finalidad de prevenir efectos nocivos sobre la población, en términos de salud, bienes materiales y medio ambiente, se desarrolla un levantamiento de información para conocer lo vigente en la actual normativa chilena y especificaciones en las bases de licitación, comparándolo con estudios y estándares internacionales en esta materia, con el fin de verificar si es requerido un mayor seguimiento de este fenómeno durante la administración de la concesión.

4.2. Revisión Bibliográfica

Federal Transit Administration (2018). Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual.
Este manual contiene procedimientos para predecir y evaluar los impactos de ruido y vibración de proyectos viales, propuestos para diferentes etapas de desarrollo de estos y a diferentes niveles de análisis. Incluye descripciones de medidas de mitigación de ruido y vibración y del ruido y vibración en etapas de construcción.

Elias, P. and Villot, M. (2011). RIVAS Railway-Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative Project.
Desarrolla una revisión de las normas, regulaciones y guías existentes, así como estudios de campo y de laboratorio que tratan la vibración de edificaciones cerca del paso de ferrocarriles que causan molestias como la vibración en el cuerpo y el ruido inducido por vibraciones, considerando también el efecto combinado de vibración y ruido. El documento resume el conocimiento y los descubrimientos recientes sobre la respuesta humana a la vibración del tránsito ferroviario, estándares y pautas de revisión en cuanto a vibración y ruido interior, incluido el efecto combinado de ruido interior y vibración; se comenta el estado de los estándares y límites actualmente utilizados.

Dirección de Vialidad (2017). Manual de Carreteras, Volumen N°9, "Consideraciones y Criterios Ambientales en Proyectos Viales". Chile
Documento de carácter normativo, que sirve de guía para las diferentes acciones que son de competencia técnica del Servicio. Establece criterios, procedimientos, especificaciones y métodos que indican las condiciones por cumplir en los proyectos y demás actividades viales, en las diversas fases que conforman el ciclo de vida de un proyecto. Dentro del Volumen N°9, "Consideraciones y Criterios Ambientales en Proyectos Viales", se presentan los mecanismos y procedimientos a realizar para la cuantificación del nivel de vibraciones según la etapa del proyecto a ejecutar.

Osama Hunaidi (2000). Traffic Vibrations in Buildings.
Describe la naturaleza y las causas de las vibraciones inducidas por el tránsito en edificaciones, y analiza las posibles medidas correctivas y preventivas a ejecutar. El foco está en las casas.

4.3. Revisión de literatura referida a vibraciones en carreteras

Para generar una propuesta de procedimiento de análisis de vibraciones en el pavimento producidas por el tránsito, se realiza una búsqueda de investigaciones, manuales y especificaciones para su seguimiento para definir de manera objetiva la metodología a seguir y ser incorporada a las nuevas concesiones.

4.3.1. Especificaciones de vibraciones en Manual de Carreteras

El Manual de Carreteras posee diversos puntos en los que proporciona información referida al fenómeno de vibraciones generadas por el tránsito vehicular de la carretera. A continuación, se enumeran las secciones involucradas:

4.3.1.1. Consideraciones Ambientales a nivel de estudio Preliminar

Del MC-V9 Estudio y Criterios Ambientales en Proyectos Viales, CAPITULO 9.400 CONSIDERACIONES AMBIENTALES ADICIONALES EN ESTUDIOS DE PROYECTOS DE NUEVO TRAZADO (Dirección de Vialidad, 2017):

SECCION 9.403 Consideraciones en el nivel de estudio preliminar

9.403.3 Caracterización del medio ambiente

9.403.302(5) Vibraciones. Este componente deberá ser estudiada sólo para Carreteras (Autopistas, Autorrutas y Carreteras Primarias) o cuando exista presencia de Monumentos Históricos o Públicos en el área de estudio del proyecto. Se deberá analizar la componente desde un punto de vista cualitativo: no se deberá hacer ningún tipo de medición. Estas, si correspondieren, se harán en el nivel de Anteproyecto, donde el análisis se hará en forma cuantitativa.

Las vibraciones ambientales generadas en proyectos viales, cuando se presentan, tienen un comportamiento muy complejo, especialmente porque las condiciones del suelo juegan un papel muy preponderante y no permiten, como en el caso del ruido donde el aire es considerado como un medio homogéneo, extrapolar los datos con la amplitud que da la propagación de ondas en el aire.

En la Tabla 4.1 se definen las distancias mínimas que deberán ser definidas, hacia ambos lados del eje del camino para la caracterización de la componente vibración, en función de las zonas detalladas más adelante.

Tabla 4.1: Distancias mínimas para la definición de área de influencia.

TABLA 9.403.302(5).A
DISTANCIAS MINIMAS PARA LA DEFINICION DEL AREA DE INFLUENCIA

Zona	Características	Distancia (m)
Tipo A	Lugar que requiere de una protección especial frente a efectos adversos producidos por las vibraciones, por ejemplo, hospitales, establecimientos educacionales, centros de reposo de ancianos, Monumentos Históricos, áreas protegidas por textos legales.	60
Tipo B	Lugar de uso habitacional, sin industrias; recintos religiosos, instalaciones culturales, tales como bibliotecas.	30
Tipo C	Lugar donde se permite la instalación de industrias inofensivas, zonas mixtas, zonas agrícolas, pequeños talleres artesanales, oficinas, comercio, recintos deportivos.	10
Tipo D	Lugar donde se permita instalar industrias inofensivas y molestas.	10

Cuando existan recintos fuera del área mínima definida por las zonas antes especificada y que cuenten con un historial que los haga sensibles a las vibraciones, éstos deberán ser incluidos en la Línea de Base de la componente vibraciones.

Se identificarán los eventuales receptores de las vibraciones producidas por el futuro tránsito de vehículos, señalando el tipo de zona a la cual pertenecen. Para ello se deberán, como principio de precaución, definir las áreas en función del receptor más sensible. Por ejemplo, cuando se esté en presencia de un lugar con una Casa de Reposo rodeado de casas habitacionales, entonces la zona deberá clasificarse como A, ya que de esa forma se asegura que la posterior proposición de las medidas ambientales considerará el caso más desfavorable.

Los Sectores Vulnerables para este componente corresponderán a todos aquellos lugares clasificados en zona A y B.

SECCION 9.403.4 Identificación, cuantificación y valoración de impactos ambientales

9.403.403 Cuantificación de Impactos Ambientales

9.403.403(1) e) Vibraciones. Para la predicción del nivel de vibración que producirá el proyecto de Carretera. Se utilizará una metodología desarrollada por la Federal Transit Administration de Estados Unidos, la cual proviene de un modelo empírico. Los niveles de vibración pueden ser estimados en decibeles (dB) mediante la utilización de una función que los relaciona con la distancia entre el receptor y el eje de la calzada, los valores presentados corresponden a un nivel de referencia, por lo tanto, ellos deberán ser corregidos según se indica más adelante. En la Tabla 4.2 se presenta dicha relación.

Tabla 4.2: Relación entre la distancia y aceleración vibratoria.

TABLA 9.403.403(1).G
RELACION ENTRE DISTANCIA Y ACELERACION VIBRATORIA

DISTANCIA (m)	Nivel de Velocidad (dB)
10	68
20	61
30	58
40	55
50	53
60	51
70	50

Relación para un vehículo liviano a 50 km/h

El valor obtenido de la Tabla 4.2 es una referencia que deberá ser corregida mediante la utilización de la siguiente expresión:

$$V_C = V_{ref} + V_{velocidad} + V_{propagación} + V_{acoplamiento} \tag{4.3.1}$$

Donde:

V_c : Nivel de velocidad corregida, en (dB);
V_{ref} : Valor de referencia obtenido de la Tabla 4.2;
$V_{velocidad}$: Corrección por efectos de velocidad, según Tabla 4.3;
$V_{propagación}$: Corrección por efectos de la propagación sobre suelos diversos, según Tabla 4.4;
$V_{acoplamiento}$: Corrección por efectos de acoplamiento entre el recinto del receptor y el suelo, según Tabla 4.5

Tabla 4.3: Corrección por velocidad.

TABLA 9.403.403(1).H
CORRECCION POR VELOCIDAD

Velocidad (km/h)	Velocidad (dB)
100	+6,0
80	+4,4
60	+2,5
30	-3,5

Tabla 4.4: Corrección por programación sobre suelos diversos.

TABLA 9.403.403(1).I
CORRECCION POR PROPAGACION SOBRE SUELOS DIVERSOS

Distancia sobre Roca (m)	Vpropagación (dB)
15	+2
30	+4
45	+6
60	+9

Tabla 4.5: Corrección por acoplamiento entre el edificio receptor y el suelo.

TABLA 9.403.403(1).J
CORRECCION POR ACOPLAMIENTO ENTRE EL EDIFICIO RECEPTOR Y EL SUELO

Tipo de acople	Vacoplamiento (dB)
Entramado de madera	-5
Edificio comercial de 1 o 2 pisos	-7
Edificio de ladrillo de 2 a 4 pisos	-10
Ladrillos sobre pilares	-10
Ladrillos sobre fundación extendida	-13
Fundación sobre roca	0

El valor estimado permitirá conocer aproximadamente los niveles de vibración que se generarán en algún receptor producto del tránsito de vehículos durante la explotación de la carretera.

9.403.404 Valoración de Impactos Ambientales

9.403.404(1) e) Vibraciones. Se deberá considerar que los límites recomendados para los niveles de velocidad vibratoria son de 65 (dB) para el caso de recintos altamente sensibles a la vibración (zonas A y B, ver Tabla 4.1) o donde se requieran bajos niveles de este contaminante. Para el caso de casas habitación o recintos de descanso, se recomienda no superar los 72 (dB) para vibración frecuente. En consecuencia, se definirá una clasificación de impactos según lo mencionado a continuación en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Clasificación de impactos debido a vibraciones.

TABLA 9.403.404(1).H
CLASIFICACION DE IMPACTOS DEBIDO A VIBRACIONES

Tipo	Descripción
A	Cuando se estime que en algún receptor se supera en más del 15% los niveles permisibles de 65 (dB) para zonas A y B, y 72 (dB) para otras zonas.
B	Cuando se estime que en algún receptor se supera en más del 5% los niveles permisibles de 65 (dB) para zonas A y B, y 72 (dB) para otras zonas.
C	Cuando en algún receptor el valor estimado varíe entre ± 5% los niveles permisibles de 65 (dB) para zonas A y B, y 72 (dB) para otras zonas.

Para el caso de impactos clasificados Tipo A o B, se deberá redefinir el trazado del camino, de modo de alejar la fuente que provoca las vibraciones hasta una distancia tal que los impactos no sean significativos. Para los de Tipo C, se deberá solicitar que el tema se estudie con mayor detalle para las alternativas que eventualmente pasarán a Anteproyecto.

SECCION 9.404 Consideraciones ambientales en el nivel de anteproyecto

9.404.3 Caracterización del Medio Ambiente

9.404.302(5) Vibraciones. Sólo se estudiarán aquellos casos donde el impacto determinado en el Estudio Preliminar haya sido clasificado como Tipo C. Se entiende que los impactos clasificados Tipo A y B fueron eliminados, mediante la redefinición del trazado, en el Estudio Preliminar. Cabe señalar que el análisis se hará sólo para proyectos de nuevo trazado de Carreteras. (Autopistas, Autorrutas, Carreteras primarias).

Adicionalmente, se deberán abordar las alternativas en estudio cuyo trazado pase a menos de 100 m de alguna estructura que pueda presentar problemas frente a las vibraciones. Se deberán considerar, para estos casos, las vibraciones que se producirían tanto en la construcción como en la explotación del camino. Se identificarán todas las estructuras, no obstante, se deberá dar especial cuidado a aquellas definidas como Monumentos Históricos, Monumentos Públicos y aquellas que, por su antigüedad, puedan sufrir daños debido a la materialización del proyecto. Cuando no se tenga seguridad respecto al comportamiento que tendrán estas estructuras frente a las eventuales vibraciones producidas por el proyecto, se deberá dejar planteada la elaboración de un plan de monitoreo, el cual se especificará durante el Estudio Definitivo y se implantará durante la construcción de las obras. Respecto a las

metodologías que se utilizarán para caracterizar esta componente, por su especificidad, deberán ser propuestas, previo a su implementación, a la Dirección de Vialidad para su aprobación.

9.404.4 Identificación, cuantificación y valoración de impactos ambientales

9.404.402 Cuantificación de Impactos Ambientales

9.404.402(1) e) Vibraciones. El paso siguiente a la identificación de impactos ambientales es su cuantificación. Para ello, dado que esta es una componente cuyo estudio no es normalmente abordado en todos los proyectos viales, será necesario que el responsable de elaborar el Anteproyecto presente, para su aprobación por parte de la Dirección de Vialidad, una metodología específica que permita cuantificar en forma aproximada los niveles de vibraciones que generaría el proyecto.

Esta componente sólo será estudiada si los resultados de los análisis del Estudio Preliminar concluyeron que producto de la construcción del nuevo camino se tiene una alta probabilidad de superar los niveles permisibles señalados en la Tabla 4.6 o que la componente no haya sido estudiada durante el nivel de Estudio Preliminar.

9.404.403 Valoración de Impactos Ambientales

9.404.403(1) e) Vibraciones. En aquellos casos de proyectos de carreteras en que haya sido necesario estimar las vibraciones en receptores cercanos al futuro camino, la valoración de los impactos producidos por las vibraciones originadas por el tránsito de vehículos durante la explotación, se regirá por los criterios y clasificación presentados en el Numeral 9.403.404(1) e) Vibraciones.

4.3.1.2. Consideraciones Ambientales adicionales en estudios de proyectos de cambio de estándar

Del MC-V9 Estudio y Criterios Ambientales en Proyectos Viales del Manual de Carreteras, Volumen N°9, CAPITULO 9.500 CONSIDERACIONES AMBIENTALES ADICIONALES EN ESTUDIOS DE PROYECTOS DE CAMBIO DE ESTANDAR (Dirección de Vialidad, 2017):

SECCION 9.503 Consideraciones ambientales en el nivel de estudio preliminar

9.503.3 Caracterización del medio ambiente

9.503.302(4) Ruido y Vibraciones. [...] Con respecto a la componente vibraciones, deberá ser estudiada sólo para Carreteras (Autopistas, Autorrutas y Carreteras Primarias) y, cuando exista presencia de Monumentos Históricos y Públicos en el área aledaña a la faja fiscal. Se deberá analizar la componente desde un punto de vista cualitativo, por lo tanto, no será necesario realizar ningún tipo de medición. Estas, si corresponden, se deberán dejar para el nivel de Anteproyecto, donde el análisis se hará en forma cuantitativa.

Se deberán identificar los eventuales receptores de vibraciones producidas tanto en la construcción como en la operación del camino, señalando el tipo de potenciales afectados.

9.503.306 Definición de Sectores Vulnerables y Presentación de la Información. Considerando la información recopilada en terreno durante la Caracterización del Medio Ambiente, se deberá identificar todas aquellas zonas, que por su alto valor ambiental, sea necesario proteger de los eventuales impactos que generará el proyecto. A estas zonas se les denominará "Sectores Vulnerables", los que deberán ser presentados en una cartografía que los destaque y defina explícitamente, en relación con el trazado del camino y las alternativas de mejoramiento. En la Tabla 9.503.306.A se puede apreciar, para cada componente, un resumen de los criterios que se deberán utilizar para definir los Sectores Vulnerables.

Toda la información relevante, recopilada y analizada para la caracterización del medio ambiente, deberá ser presentada en un plano de escala mínima 1:10.000, donde se puedan apreciar las singularidades de las distintas componentes estudiadas y que representen un aporte al proyecto. En aquellos casos donde la gran cantidad de antecedentes pueda hacer confuso la representación cartográfica, se deberá entregar planos temáticos por separado para el Medio Físico, Biótico y Socioeconómico.

Los planos deberán mostrar claramente la información relativa a cada componente, tanto en el trazado del camino principal, como en las posibles variantes, destacando los lugares identificados como Sectores Vulnerables, por lo que en este sentido, se necesitará trabajar con técnicas visuales, tales como delimitación de áreas mediante el uso de colores o achurado.

Los resultados de la caracterización del Medio Ambiente deberán ser entregados al Proyectista, de modo que éste pueda definir las alternativas de mejoramiento teniendo en cuenta la variable ambiental. Una vez definidos los requerimientos del proyecto, se procederá a identificar los impactos ambientales

asociados a este, definiendo, mediante itemizados, las obras necesarias para mitigar esos impactos, según lo señalado en el Tópico 9.503.4 Identificación, Cuantificación y Valoración de Impactos Ambientales.

9.503.4 Identificación, cuantificación y valoración de impactos ambientales

9.503.402 Cuantificación de los Impactos Ambientales .

9.503.402(1) Ruido y Vibraciones. [...] Con respecto a las vibraciones, el efecto de esta componente, durante la operación del camino, podrá ser dimensionado utilizando un método empírico desarrollado por la Federal Transit Administration de Estados Unidos, el que se presenta en el numeral 9.403.403(1) e de este Volumen.

Finalmente, en los casos en que el especialista ambiental lo justifique técnicamente, se deberá proponer un plan de monitoreo al respecto durante la etapa de construcción de las obras, enfocado principalmente al control de las maquinarias y equipos.

9.503.403(1) Medio Físico.

9.503.403(1) d) Ruido y Vibraciones.

En lo que respecta a las vibraciones, para el caso de recintos altamente sensibles a esta componente, se definirá una clasificación de impactos según lo mencionado a continuación en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Clasificación de impactos debido a vibraciones.

TABLA 9.503.402(1).I
CLASIFICACION DE IMPACTOS DEBIDO A VIBRACIONES

Tipo	Descripción
A	Cuando se estime que en algún receptor se supera en más del 15% los niveles permisibles de 65 (dB) para zonas A y B, y 72 (dB) para otras zonas.
B	Cuando se estime que en algún receptor se supera en más del 5% pero menos de 15% los niveles permisibles de 65 (dB) para zonas A y B, y 72 (dB) para otras zonas.
C	Cuando en algún receptor el valor estimado supera en menos de 5% los niveles permisibles de 65 (dB) para zonas A y B, y 72 (dB) para otras zonas.

Nota: La clasificación de las distintas zonas se puede encontrar en la Tabla 9.403.302(5).A de este Volumen Nº9.

Para el caso de impactos clasificados Tipo A y B, se deberá redefinir el trazado del camino o las obras de mejoramiento, de modo de alejar la fuente que provoca las vibraciones hasta una distancia tal, que los impactos no sean significativos. Para los de Tipo C se deberá indicar que el tema se estudie con mayor detalle en el nivel de Anteproyecto.

SECCION 9.504 Consideraciones ambientales en el nivel de anteproyecto

9.504.3 Caracterización del medio ambiente

9.504.302(5) Vibraciones. Será válido este análisis sólo en los casos en que el camino se emplace a menos de 100 metros de alguna estructura que pueda presentar problemas frente a las vibraciones. Para esto, se deberán considerar las vibraciones que se puedan producir, tanto en la construcción como en la operación del camino.

Se identificarán todas las estructuras, prwefestando especial cuidado a aquellas definidas como Monumentos Históricos, Monumentos Públicos y aquellas que, por su antigüedad, puedan sufrir daños debido a la materialización del proyecto.

En los casos en que no se tenga seguridad respecto al comportamiento que tendrán estas estructuras, frente a las eventuales vibraciones derivadas de la ejecución del proyecto, se deberá dejar planteada la elaboración de un plan de monitoreo, el cual se especificará durante el Estudio Definitivo y se implementará durante la construcción del camino.

Respecto a las metodologías que se utilizarán para caracterizar esta componente, por su especificidad, deberán ser propuestas a la Dirección de Vialidad para su aprobación. Por su parte, los TRAE del estudio deberán señalar la pertinencia de hacer esta caracterización, de modo que, el responsable de abordar el estudio presente dicha metodología y, también, pueda estimar sus costos.

9.504.4 Identificación, cuantificación y valoración de impactos ambientales

9.504.402 Cuantificación de los Impactos Ambientales

9.504.402(1) d) Ruido y Vibraciones. [. . .] En lo que respecta a las vibraciones, análogamente a lo indicado anteriormente, se deberán cuantificar los impactos con la información obtenida en esta etapa, en base a una metodología que permita estimar los niveles de vibraciones que generará el proyecto, lo que tendrá que presentarse para la aprobación de la Dirección de Vialidad.

9.504.403 Valoración de Impactos Ambientales

9.504.403(1) d) Ruido y Vibraciones.[. . .] Con respecto al efecto causado por las vibraciones del tránsito, será el especialista ambiental quien proponga las medidas adecuadas a cada caso particular.

4.3.1.3. Consideraciones Ambientales durante la construcción de obras viales

Del MC-V9 9.700 Estudio y Criterios Ambientales en Proyectos Viales, CAPITULO 9.700 CONSIDERACIONES AMBIENTALES DURANTE LA CONSTRUCCION DE OBRAS VIALES (Dirección de Vialidad, 2017):

SECCION 9.703 Consideraciones ambientales durante la ejecución

9.703.7 Movimiento de tierras

9.703.702 Terraplenes

El proyecto de terraplenes durante la etapa de estudio, deberá considerar las ETGC indicadas en la Sección 5.205 Formación y Compactación de Terraplenes, del Volumen N° 5, a las cuales se deberá añadir una serie de procedimientos conducentes a mitigar o compensar los impactos, y reducir riesgos asociados a la etapa de construcción.

En la Tabla 9.703.702.A, se indican algunas alternativas de medidas que se pueden proponer al momento de confeccionar el correspondiente Informe de Manejo Ambiental:

Además, se deberán tener presente las siguientes consideraciones ambientales en las distintas etapas de construcción de terraplenes:

- Compactación: Se deberá evitar la emisión de material particulado, ruidos y vibraciones, en sectores con población cercana y, el aumento de la sedimentación e interrupción de cauces en quebradas y cursos de aguas. Tener precaución en el desarrollo de las obras, en cuanto al despeje y limpieza de vegetación, presencia de sitios arqueológicos no catastrados en la etapa de línea de base proveniente del Estudio, presencia de sectores de nidificación y hábitat de fauna existente en el lugar.
- Formación y ensanche: Se deberán incluir las consideraciones mencionadas para el caso anterior. Además, se deberán instalar alcantarillas y tubos apropiados al caudal, de los cauces y desagües, considerando episodios excepcionales.

Según haya sido indicado en el Estudio, o lo crea necesario el Inspector Fiscal, se efectuará un seguimiento de las medidas ejecutadas, con el fin de garantizar el éxito de las obras y la consecución de los objetivos planteados. Este deberá efectuarse sobre la base de los siguientes aspectos:

- Descripción de las medidas a monitorear,
- Frecuencia de monitoreos, si es pertinente,
- Responsable del Seguimiento,
- Sistema de registro de la información,
- Tiempo de Medición.

4.3.2. Estudios Internacionales

4.3.2.1. NSW Road Noise Policy (Department of Environment and NSW, 2011).

De acuerdo con el manual del Departamento de Medio Ambiente, Cambio climático y Agua de Nueva Gales del Sur (Australia), es poco probable que los vehículos que operan en una carretera causen un nivel perceptible de vibración a menos que haya **irregularidades importantes en la ruta**, particularmente si el receptor afectado está a más de 20 metros de la carretera. A menudo, se cree erróneamente que la vibración de los elementos de construcción livianos, como las ventanas, es causada por la vibración del tránsito que se produce en el suelo y que viaja hacia el edificio a través de los cimientos de este. Sin embargo, a menudo este fenómeno se debe a las **emisiones de ruido** de baja frecuencia aerotransportadas, normalmente de vehículos pesados y autobuses, que hacen que los elementos de construcción livianos vibren. Las quejas sobre la vibración son registradas por la NSW Roads and Traffic Authority en su base de datos del Noise Abatement Program para su posterior evaluación.

4.3.2.2. Medición e interpretación de vibraciones producidas por el tráfico en Bogotá D.C. (Vacca et al., 2011).

Definición de límites para evitar daños.
De forma general los criterios que definen umbrales de vibración que pueden causar daño estructural, no solo dependen de la vibración, también están sujetos a la carga estructural, características de los materiales, a las características dinámicas, a la amplitud de excitación y a la frecuencia sensible. Autoridades de estandarización en el mundo entero, han definido directrices sobre niveles permisibles de la vibración en suelos con afectación a edificios (Normas ISO 2631, ISO 6897 y DIN 4150). En las normas y literatura disponible, se ha trabajado tradicionalmente con los criterios de aceleración y velocidad de partículas en la definición de los valores límites para evitar daños en sistemas estructurales. Muchos códigos e investigadores dan límites permisibles de la vibración estructural en términos de velocidad peak de la partícula (Vpp).

No obstante, las normas internacionales han establecido unos valores de velocidad límite de las partículas del suelo (asociadas con vibraciones) por encima de los cuales es probable que se generen daños visibles en los elementos de una edificación. Sin embargo hay que recordar que estos valores son indicativos. Teniendo en cuenta lo anterior, la norma DIN 4150, establece los valores máximos de velocidad de vibración (en mm/s) en función de la frecuencia, para que no se observan daños en diferentes tipos de edificaciones (comercial, viviendas, edificios, industrias). Estos valores se presentan en la Tabla 4.8. Lo propio se presenta en la referencia (ITME, 1985) cuyos valores límites se resumen en la Tabla 4.9.

Por su parte los estándares australianos (AS 2187.2) establecen como límite para edificaciones residenciales una velocidad máxima de 10 mm/s. En el mismo estándar se establece para edificios

Tabla 4.8: Valores máximos de velocidad de partícula (mm/s) para evitar daños (Norma DIN 4150).

Tipo de Edificación / *Type of Building*	Frecuencia / *Frequency*		
	< 10 Hz	10-50Hz	50-100 Hz
Estructuras delicadas, muy sensibles a la vibración / *Weak buildings, highly sensitive to vibrations*	3	3-8	8-10
Viviendas y Edificios / *Housing and buildings*	5	5-15	15-20
Comercial e Industrial / *Commercial and Industrial*	20	20-40	40-50

Tabla 4.9: Valores máximos de velocidad de partícula establecidos en la referencia (ITME, 1985).

Tipo de Edificación *Type of Building*	Velocidad máxima de partícula *Particle peak velocity*
Para edificaciones en muy mal estado de construcción o edificios en madera o mampostería *For buildings under poor construction conditions, wooden or masonry buildings*	12 mm/s
Edificios muy sensibles a las vibraciones *Building highly sensitive to vibrations*	0 a 10 Hz → 3 mm/s 10 a 50 Hz → 3 a 8 mm/s 50 a 100 Hz → 8 a 10 mm/s

comerciales e industriales de concreto reforzado o de acero un límite máximo de 25 mm/s y para hospitales, presas, edificios históricos se establece un límite de 5 mm/s.

De la misma manera en los estándares Ingleses (BS 7385) se establece una velocidad máxima de 50 mm/s para estructuras aporticadas de industrias y edificios comerciales con frecuencia de vibración superior a 4 Hz. En la misma norma se sugiere un límite entre 15 y 20 mm/s para edificaciones sin refuerzo, residenciales y con frecuencias entre 4 Hz y 15 Hz.

Por ejemplo, la asociación suiza de la estandarización, (SN 640) especificó 12 mm/s como nivel permisible para el acero o estructuras en concreto reforzado, 5 mm/s para los edificios en mampostería, y 3 mm/s para los edificios de interés arquitectónico o estructuras sensibles.

Es importante anotar que las condiciones socioeconómicas y las normativas de cada país están directamente asociadas con los límites establecidos anteriormente, ya que una edificación de vivienda tipo residencial construida en Australia, Estados Unidos o en Europa tendrá en general un comportamiento mecánico diferente al de una construida en un país en vías de desarrollo.

Medición de vibraciones

En el estudio se usaron equipos de alta sensibilidad conformado por los siguientes elementos:

- Cuatro acelerómetros sísmicos uniaxiales de alta resolución. Los acelerómetros tienen la capacidad de medir aceleraciones en un rango desde 0.00001 hasta 0.5 g. La respuesta de estos sensores se mantiene lineal para un rango de frecuencias entre 0.05 y 200 Hz.
- Amplificadores y filtros para los acelerómetros que permite establecer amplificaciones de 10, 100 o 1000 mV/g y filtros por encima de los 450 Hz y de los 100 Hz.
- Sistemas de adquisición de datos para varios canales que permite tomar datos a una velocidad de 2000 datos por segundo (2 kHz).
- Computador portátil para control y toma de datos.
- Cables varios con longitudes hasta de 50 metros.

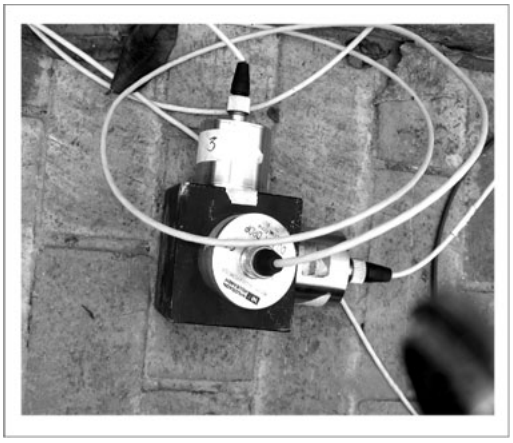


Figura 4.1: *Acelerómetros sísmicos usados para la instrumentación.*

Fuente: Vacca et al. (2011)

En la medición se establecieron tres parámetros fundamentales:

1. Aceleración máxima de los registros (A max).
2. Velocidad peak de partícula (Vpp).
3. Frecuencia dominante de cada registro.

De acuerdo con (Watts, 2000) si se incrementan las velocidades de los vehículos automáticamente las velocidades peak de partícula crecerían.

Con base a los límites encontrados en normas, se elaboró una gráfica con el fin de incluir límites asociados con el confort de las personas así como límites para estructuras, cimentaciones y máquinas. Esta gráfica depende de la amplitud de movimiento, estimada con base en la aceleración registrada con los acelerómetros (mediante técnicas numéricas y suponiendo osciladores simples), y depende también de la frecuencia dominante de la señal. Es por ello que en la Figura 4.2 se incluyen las mediciones realizadas en el estudio. Los desplazamientos se estimaron a partir de los registros de aceleración mediante técnicas numéricas básicas de la dinámica estructural.

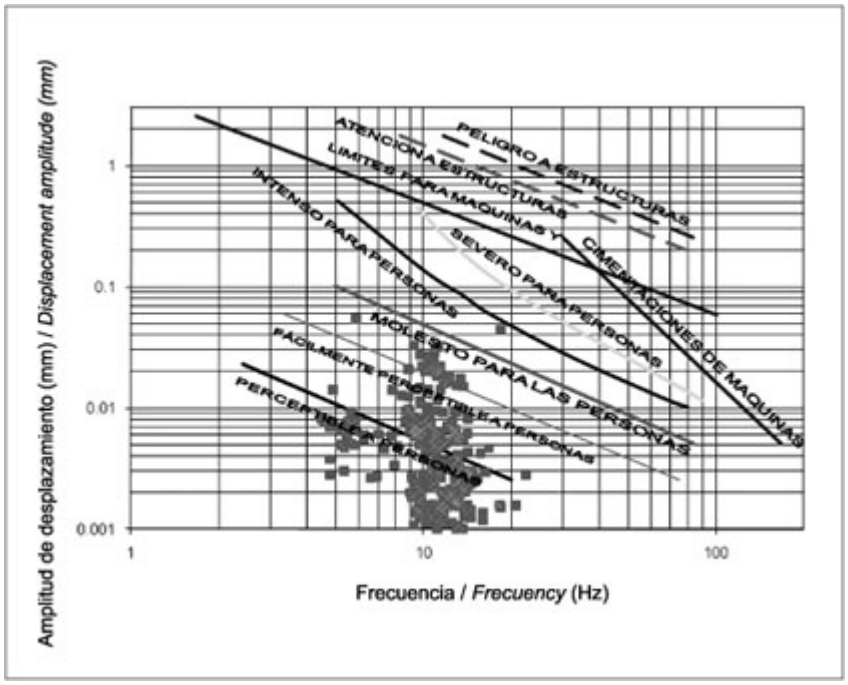


Figura 4.2: *Límites asociados con confort en función de la frecuencia del registro.*

Fuente: Vacca et al. (2011)

Conclusiones del estudio

- En general se encontró que los valores máximos de aceleración y velocidad a distancias superiores a 45 m de la fuente, tienden a ser similares a los valores del ruido base.
- A la luz de los resultados experimentales, a mayor velocidad de ondas "S" las amplitudes de desplazamiento registradas disminuyen y la frecuencia de los registros se incrementa debido a que la rigidez del suelo aumenta.

4.3.2.3. Transit Noise and Vibration Impact Assessment (Federal Transit Administration, 2018).

Fuentes de vibración proveniente del suelo debido al tránsito

La vibración transmitida por el suelo puede ser una preocupación para los vecinos cercanos de una ruta del sistema de tránsito o una instalación de mantenimiento. Sin embargo, a diferencia del ruido en el aire, la vibración en el suelo no es un problema ambiental común. Es inusual que la vibración de fuentes como autobuses y camiones sea perceptible, incluso en lugares cercanos a las carreteras principales.

La mayoría de las vibraciones interiores perceptibles son causadas por fuentes dentro de los mismos edificios, como por ejemplo:

- operación de equipos mecánicos.
- movimiento de personas o los portazos.

Las fuentes típicas de ondas de vibración que se propagan a través del suelo y crean vibraciones perceptibles transmitidas por el suelo en edificios cercanos incluyen:

- equipos de construcción.
- trenes con ruedas de acero.
- tráfico en carreteras superficialmente deterioradas.

Si la carretera es superficialmente bastante regular (”lisa”), la vibración del tráfico con neumáticos de goma rara vez es perceptible.

El daño en los edificios debido a la vibración en proyectos de transporte típicos, es raro ; pero en casos extremos, como durante las voladuras o el hincamiento de pilotes durante la construcción, la vibración podría causar daños a los edificios.

La Figura 4.3 ilustra fuentes de vibración comunes y la respuesta humana y estructural a la vibración transmitida desde el suelo que varía desde aproximadamente 50 VdB (debajo de la perceptibilidad) a 100 VdB (el umbral de daño potencial). El nivel de velocidad de vibración de fondo en áreas residenciales suele ser de 50 VdB o menos y el umbral de percepción para los humanos es de aproximadamente 65 VdB. Un nivel de vibración de 85 VdB en una residencia puede resultar en una fuerte molestia.

Autobuses y camiones **rara vez generan vibraciones** que superan los 70 VdB a menos que hayan irregularidades debido a baches frecuentes en la carretera.

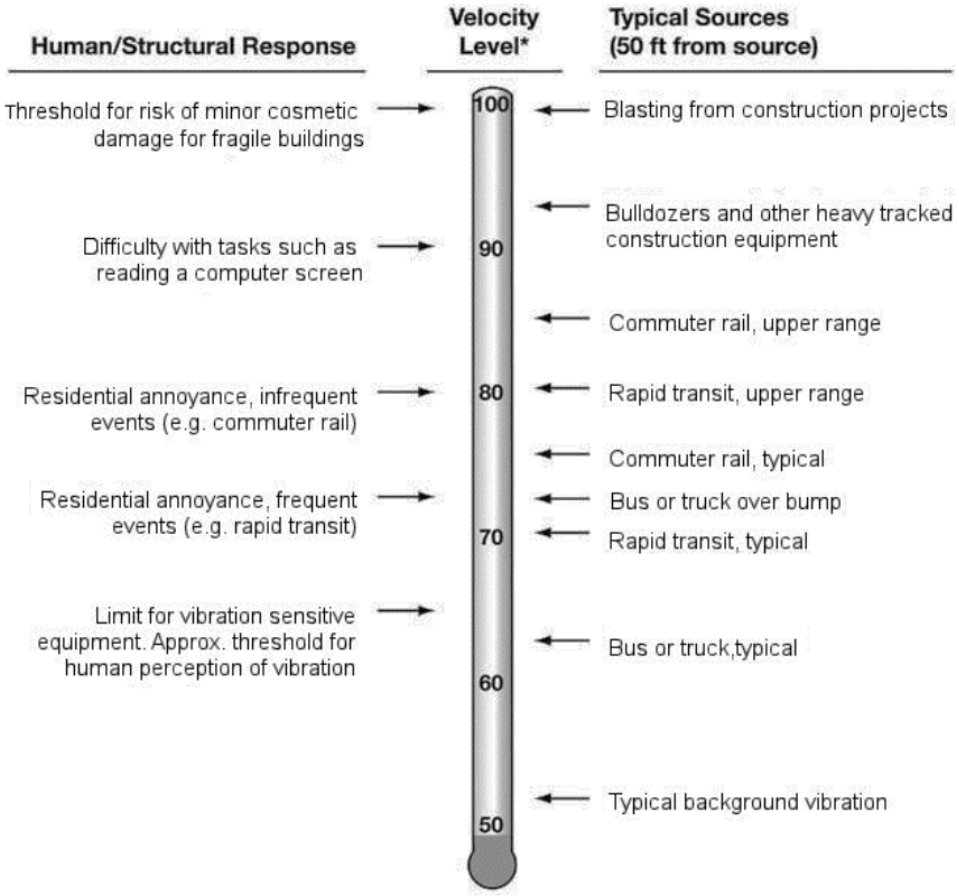


Figura 4.3: *Niveles típicos de vibración en el suelo.*

Fuente: Federal Transit Administration (2018)

Un camino o pista inusualmente irregular, llantas de ruedas de acero, condiciones geológicas que promueven la propagación eficiente de la vibración o vehículos con sistemas de suspensión muy rígidos podrían aumentar los niveles de vibración típicos en aproximadamente 10 VdB.

Los factores comunes que contribuyen a la vibración y el ruido transmitidos por el suelo se presentan en la Tabla 4.10, de la Tabla 5-2 de la Federal Transit Administration (2018).

Tabla 4.10: Factores que influyen en los niveles de vibración y ruido transmitidos por el suelo según la fuente.

Category	Factors	Influence
Operations and Vehicles	Speed	Higher speeds result in higher vibration levels. Doubling speed results in a vibration level increase of approximately 4 to 6 dB.
	Vehicle Suspension	Stiff suspension in the vertical direction can increase the effective vibration forces. On transit cars, the primary suspension has the largest effect on vibration levels.
	Wheel Condition and Type	Wheel flats and general wheel roughness are major sources of vibration from steel wheel/steel rail systems. Resilient wheels on rail transit systems can provide some vibration reduction over solid steel wheels, but are usually too stiff to provide substantial reduction. For more information, see Section 6.4, Step 2.
Guideway	Track/Roadway Surface	Rough track or rough roads are often sources of excessive vibration. Maintaining a smooth surface will reduce vibration levels.
	Track Support System	On rail systems, the track support system is one of the major components in determining the levels of vibration. The highest vibration levels are created by track that is rigidly attached to a concrete trackbed (e.g., track on wood half-ties embedded in the concrete). The vibration levels are much lower when special vibration control track systems such as resilient fasteners, ballast mats, and floating slabs are used.
	Transit Structure	Heavier transit structures typically result in the lower vibration levels. The vibration levels from a lightweight bored tunnel will usually be higher than from a poured concrete box subway.
	Transit System Elevation	A rail system guideway will be either underground (subway), at-grade, or elevated, with substantial differences in the vibration characteristics at each elevation. ▪ Underground: vibration is typically the most important environmental factor of interest. ▪ At-grade: airborne noise is typically the dominant factor, although vibration and noise can be a problem, particularly at interior locations well isolated from exterior noise. ▪ Elevated: it is rare for vibration to be an issue with elevated railways except when guideway supports are located within 50 ft of buildings.

Autobuses como fuente de vibración

Debido a que los neumáticos de goma y los sistemas de suspensión de los autobuses proporcionan aislamiento de vibración, es poco común que los autobuses causen vibraciones o problemas de ruido en el suelo. Para la mayoría de los problemas de vibración relacionada con el bus, como el ruido de las ventanas, la causa casi siempre es el ruido aéreo y está directamente relacionada con las condiciones de la superficie de la carrera, como baches, protuberancias, juntas de expansión u otras discontinuidades en la superficie de la carretera (generalmente resueltas por suavizado de las discontinuidades).

Los autobuses que operan dentro de los edificios probablemente causarán problemas de vibración para otros ocupantes del edificio. Un ejemplo de esta situación es una estación de autobuses ubicada en el mismo edificio que el de oficinas comerciales. La carga repentina de una losa por parte de un vehículo pesado en movimiento o por vehículos que corren sobre los separadores divisores del carril (lane divider bumps) puede causar una vibración intrusiva en el edificio.

Trayectoria de vibración proveniente del suelo debido al tránsito

Se sabe que las condiciones del suelo y del subsuelo tienen una fuerte influencia en los niveles de vibración del suelo. Entre los factores más importantes se encuentran la rigidez y la amortiguación interna del suelo y la profundidad al lecho de roca. La propagación de vibraciones es más eficiente en suelos arcillosos rígidos. La roca poco profunda puede concentrar la energía de vibración cerca de la superficie, lo que ocasiona problemas de vibración en el suelo a grandes distancias de la pista. Factores tales como las capas del suelo y la profundidad del nivel freático pueden tener efectos sustanciales en la propagación de la vibración transmitida por el suelo. Estos factores se resumen en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Factores que influyen en los niveles de vibración y ruido provinientes del suelo a lo largo del camino, de la Tabla 5-3 de la Federal Transit Administration (2018).

Geology Factors	Influence
Soil type	Vibration levels are generally higher in stiff clay-type soil than in loose sandy soil.
Rock layers	Vibration levels are usually high near at-grade track when the depth to bedrock is 30 ft or less. Subways founded in rock will result in lower vibration amplitudes close to the subway. Vibration levels do not attenuate as rapidly in rock as in soil.
Soil layering	Soil layering can have a substantial effect on the vibration levels since each stratum can have considerably different dynamic characteristics.
Depth to water table	The presence of the water table may have a substantial effect on vibration, but a definite relationship has not been established.

Factores del receptor que influyen en la vibración transmitida por el suelo

Los niveles de vibración dentro de un edificio dependen de la energía de vibración que llega a los cimientos del edificio, el acoplamiento de los cimientos del edificio al suelo y la propagación de la vibración a través del edificio. En general, cuanto más pesado es un edificio, menor será la respuesta a la energía de vibración incidente. Los factores comunes que contribuyen a la vibración y el ruido transmitidos por el suelo en el receptor se presentan en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Factores que influyen en los niveles de vibración y ruido transmitidos por el suelo en el receptor, de la Tabla 5-4 de la Federal Transit Administration (2018).

Receiver Building Factors	Influence
Foundation type	The heavier the building foundation, the greater the coupling loss as the vibration propagates from the ground into the building.
Building construction	Each building has different characteristics relative to structure-borne vibration, but, in general, the heavier the building, the lower the levels of vibration. The maximum vibration amplitudes of the floors and walls of a building will often occur at the resonance frequencies of the components of the building.
Acoustical absorption	The more acoustically absorptive materials in the receiver room, the lower the ground-borne noise level. Note that because ground-borne noise usually is a low-frequency phenomenon, it is affected by low-frequency absorption (e.g., below 250 Hz).

Respuesta humana a la vibración y el ruido transmitidos por el suelo

Los efectos de la vibración en el suelo pueden incluir movimientos perceptibles de los pisos en edificios, traqueteo de ventanas, sacudidas de artículos en estantes o colgados en paredes y ruido de baja frecuencia (ruido en el suelo).

El daño a los edificios **no es un factor para los proyectos de transporte típicos**, pero en casos extremos, como durante la voladura o la colocación de pilotes durante la construcción, la vibración podría causar daños a los edificios. Aunque el umbral de perceptibilidad es de aproximadamente 65 VdB, la respuesta humana a la vibración no suele ser sustancial a menos que la vibración exceda de 70 VdB (Tabla 4.12). Un nivel de vibración que causa molestias está muy por debajo del umbral de riesgo de daños para edificios típicos (100 VdB).

La vibración en el suelo **casi nunca es un problema en exteriores**. Aunque el movimiento del suelo puede ser percibido, sin los efectos asociados con la sacudida de un edificio, el movimiento no provoca la misma reacción adversa humana.

4.3.2.4. Traffic Vibrations in Buildings (Hunaidi, 2000).

Factores que influyen en el nivel de vibración y la frecuencia

El tránsito por la carretera tiende a producir vibraciones con frecuencias predominantemente en el rango de 5 a 25 Hz. La amplitud de las vibraciones varía entre 0,005 y 2 m/s^2 medidos como aceleración, o 0,05 y 25 mm/s medidos como velocidad. Las frecuencias predominantes y la amplitud de la vibración dependen de muchos factores como:

- condición de la carretera.
- peso, velocidad y sistema de suspensión del vehículo.
- tipo y estratificación del suelo.
- estación del año.
- distancia a la carretera.
- tipo de edificio.

Los efectos de estos factores son interdependientes y es difícil especificar relaciones simples entre ellos.

Generalmente, cuanto más irregular es la carretera, mayor es la relevancia de la velocidad que afecta a la amplitud de la vibración. El efecto del tipo de sistema de suspensión también depende de la velocidad del vehículo y la regularidad de la carretera. Para condiciones de baja velocidad y sin irregularidades, el efecto del tipo de sistema de suspensión no es significativo, pero para velocidades altas y caminos irregulares, el tipo de sistema de suspensión se vuelve importante (Figura 4.4).

Los niveles de vibración inducidos por los dos vehículos fueron similares a 25 km/h. Sin embargo, a 50 km/h, los niveles de vibración inducidos por el autobús eran aproximadamente el doble de los inducidos por el camión.

Por lo general, las vibraciones del tránsito son peores en las áreas que las subyace una capa de suelo de arcilla blanda que tiene entre 7 y 15 m de profundidad. En estas áreas, las frecuencias naturales del suelo pueden coincidir con las de las casas y sus pisos, lo que lleva a resonancia o vibración amplificada.

Los niveles de vibración disminuyen con la distancia de la carretera como resultado de la "propagación geométrica" de la energía de vibración y su disipación por la viscosidad y/o fricción del suelo, similar a lo que ocurre en las ondulaciones inducidas al arrojar una piedra a un estanque donde se vuelven más planas a medida que se extienden. Los suelos rara vez son homogéneos y usualmente están estratificados por lo que los patrones de propagación son muy complejos y las relaciones de atenuación son específicas del sitio.

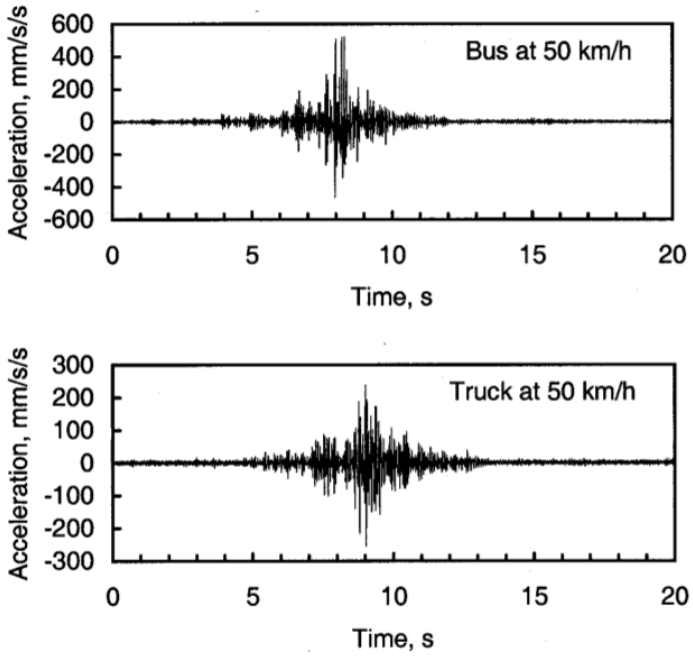


Figura 4.4: *Comparación entre los niveles de vibración inducidos por el tránsito de un autobús y un camión. Los niveles de vibración son significativamente diferentes debido a las diferencias en los sistemas de suspensión.*

Fuente: Hunaidi (2000)

Medición y análisis de vibraciones.

Para evaluar el efecto de las vibraciones en un edificio, las mediciones normalmente se deben realizar en los cimientos o en el suelo cerca del edificio en el lado que da a la carretera. Los sensores de vibración deben montarse utilizando métodos que puedan transmitir fielmente al transductor el movimiento real del suelo o los componentes del edificio en el rango de frecuencia de interés. Si se sospecha que el método de montaje distorsiona el movimiento, se deben probar métodos alternativos.

El grado de detalle requerido en el análisis de las señales de vibración depende de la naturaleza y finalidad de la investigación.

Efecto de las vibraciones en las personas.

Las vibraciones del edificio causadas por el tránsito no son un problema de salud ni seguridad, son más un problema de molestia. Las vibraciones pueden ser inaceptables para los ocupantes debido a las molestas sensaciones físicas producidas en el cuerpo humano, la interferencia con actividades como el sueño y la conversación, el traqueteo de los cristales de las ventanas y los objetos sueltos, y el temor de daños al edificio y a su contenido. Las normas se ocupan principalmente de la vibración continua

e intermitente, como la inducida por la maquinaria, la colocación de pilotes y la vibración impulsiva, como la inducida por voladuras.

Los estándares no son claros sobre cómo evaluar las vibraciones de los autobuses y camiones, que tienen características de duración y amplitud relativamente compleja.

Potenciales daños en construcciones.

Los niveles de vibración del tránsito **rara vez son lo suficientemente altos** como para ser la causa directa de daños como grietas en paredes y techos, separación de bloques de mampostería y grietas en los cimientos, aunque podrían contribuir al proceso de deterioro por otras causas difíciles de establecer de acuerdo con el nivel de vibración. Además del daño causado directamente por la vibración, el daño indirecto puede resultar de movimientos diferenciales causados por el asentamiento del suelo debido a la densificación. Los suelos arenosos sueltos son particularmente susceptibles a la densificación cuando se someten a vibración.

Valores referenciales de vibración especificados en los estándares publicados para daños a viviendas son mucho más altos que el nivel de percepción humana.

Soluciones sugeridas y estrategias preventivas

Las soluciones y estrategias preventivas que se han sugerido para reducir la vibración a un nivel aceptable, de las cuales, algunas han demostrado ser efectivas, incluyen:

- mantenimiento periódico de las superficies de las carreteras.
- control del flujo y la velocidad del tránsito.
- mejoramiento de la estructura de las carreteras.
- mejora del suelo.
- distancia suficiente entre carreteras y edificios.

El método de corrección más económico y efectivo es el mantenimiento de la superficie de la carretera, por ejemplo, nivelar tapas de alcantarillas, parchar baches y aplicar una nueva capa de pavimento. Sin embargo, suele ser una medida a corto plazo; por ejemplo, las grietas y los deterioros en el pavimento original reaparecen en la superposición. Por lo tanto, las carreteras deben ser mantenidas con más frecuencia de lo que normalmente se requiere para la buena comodidad, seguridad y apariencia del usuario.

Reducir los límites de velocidad y restringir el tránsito de vehículos pesados, son estrategias generalmente difíciles de hacer cumplir.

La evidencia experimental y teórica indica que mejorar la estructura de la carretera aumentando su grosor y rigidez no es efectivo para reducir los niveles de vibración en el rango de frecuencia predominante de la vibración inducida por el tránsito (Figura 4.5).

Por otro lado, la mejora de la estructura del suelo bajo las carreteras utilizando técnicas de mezcla profunda (deep mixing) podría reducir los niveles de vibración.

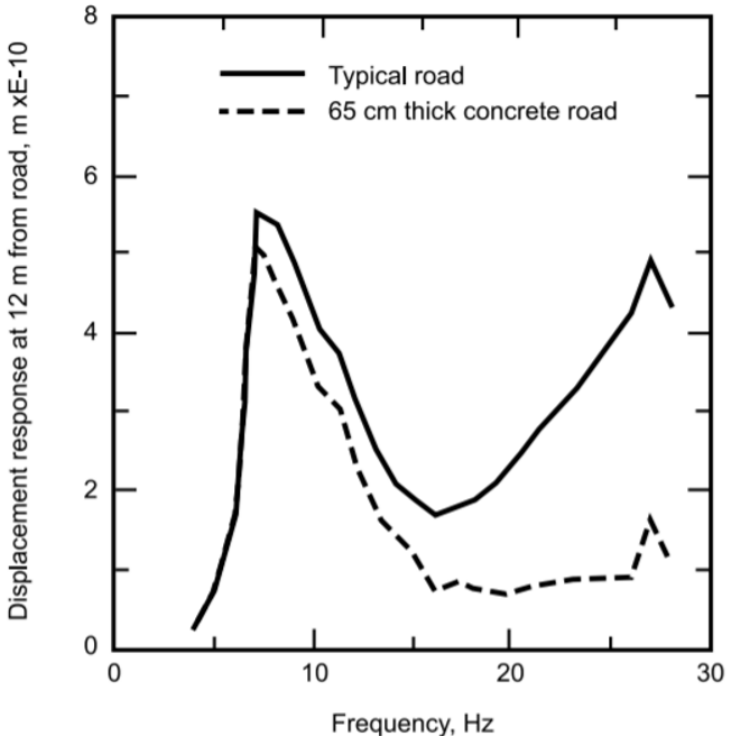


Figura 4.5: *Efecto de la variación de la rigidez del pavimento en los niveles de vibración. Las estructuras de carreteras más rígidas no disminuyen significativamente los niveles de vibración en las frecuencias que afectan más a las casas (8 a 15 Hz).*

Fuente: Hunaidi (2000)

Aumentar la distancia entre carreteras y casas podría ser una estrategia práctica para los desarrollos planificados. Cuando las vibraciones son el resultado de impactos con un bache o una grieta en la carretera y considerando solo la amortiguación geométrica, los niveles de vibración podrían disminuir al menos un tercio por cada duplicación de la distancia si el suelo es homogéneo. En la mayoría de los casos, las relaciones de atenuación son específicas del sitio y por lo tanto, deben medirse en el lugar para determinar la distancia necesaria.

Para los edificios existentes, la medida de reparación más práctica es el **mantenimiento de carreteras**. Para proyectos nuevos, el **aumento de la distancia entre edificios y carreteras** y la **mejora de la estructura del suelo** podrían ser eficaces.

4.3.2.5. The effect of road unevenness on the dynamic vehicle response and ground-borne vibrations due to road traffic (Lak et al., 2011).

Se estudia la relación entre la irregularidad de la carretera, la respuesta dinámica del vehículo y las vibraciones transmitidas a través del suelo. Las mediciones in situ de la irregularidad de la carretera y la respuesta dinámica del vehículo para seis carreteras con diferentes tipos de pavimento se complementan con predicciones numéricas de las vibraciones del suelo. Las predicciones se realizan en dos etapas. En la primera etapa, la respuesta dinámica del vehículo se calcula en función de la irregularidad de la carretera medida. El modelo del vehículo se valida comparando la respuesta predicha y medida del vehículo y posteriormente se usa para predecir las cargas dinámicas del vehículo. En la segunda etapa, se considera el problema dinámico de interacción carretera-suelo y se calculan las funciones de transferencia entre la carretera y el suelo.

El objetivo es estudiar vibraciones del suelo debido a las irregularidades en la superficie para diferentes tipos de pavimentos.

El análisis está basado en mediciones en terreno y predicciones numéricas de vibraciones transmitidas a través del suelo debido al tránsito. Las mediciones en terreno consisten en datos coleccionados dentro del marco de dos campañas de medición.

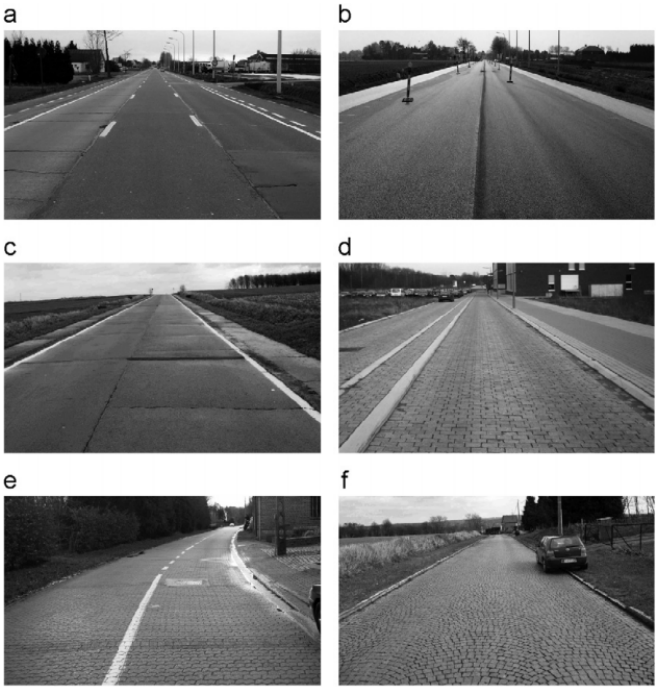


Figura 4.6: *Pavimentos considerados en el estudio: (a) Pavimento JPCP deteriorado, (b) pavimento JPCP rehabilitado, (c) pavimento JPCP, (d) pavimento de bloques de concreto, (e) y (f) pavimentos de adoquines.*

Fuente: Lak et al. (2011)

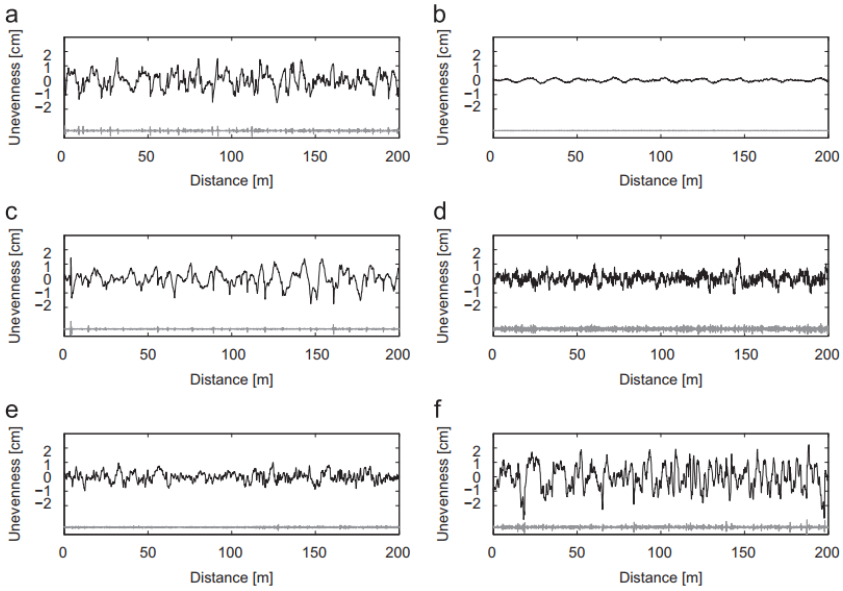


Figura 4.7: *Pavimentos considerados en el estudio: (a) Pavimento JPCP deteriorado, (b) pavimento JPCP rehabilitado, (c) pavimento JPCP, (d) pavimento de bloques de concreto, (e) y (f) pavimentos de adoquines.*

Fuente: Lak et al. (2011)

Resultados:

Se estudia la relación entre el nivel irregularidad en la carretera, la respuesta dinámica del vehículo y el nivel de vibraciones en el suelo. La clase de calidad de la norma ISO 8608, el IRI y el coeficiente de uniformidad CP_1.25 se utilizaron como indicadores de irregularidad en la carretera. La respuesta dinámica del vehículo se caracteriza por el promedio del valor RMS de la aceleración de la carrocería del vehículo. El promedio se calcula en una ventana de tiempo de 7.2 s, correspondiente al tiempo requerido por el vehículo para recorrer una distancia de 100 m a una velocidad de 50 km/h. El nivel de las vibraciones transmitidas por el suelo se cuantifica por el promedio del valor peak del valor RMS de la velocidad de vibración vertical para las 11 secciones consideradas en el estudio. Para el JPCJ deteriorado y rehabilitado, también se presentan los resultados medidos. Estos parámetros se resumen en la Tabla 4.13 y se expresan como un porcentaje del valor máximo previsto para facilitar la comparación.

Tabla 4.13: Road class, IRI, $CP_1.25$, valor medio RMS de la aceleración del cuerpo del camión, y máximo valor RMS de la velocidad del suelo para las diferentes superficies. Todos los valores están expresados como un porcentaje del valor máximo predicho. Los valores entre paréntesis son derivados de mediciones.

	Road unevenness			RMS acceleration on		RMS velocity in free field				
	Road class	IRI (%)	$CP_{1.25}$ (%)	Rear body (%)	Front body (%)	at 4 m (%)	at 8 m (%)	at 16 m (%)	at 32 m (%)	at 64 m (%)
Deteriorated JPCP	B–C	64	65	98 (106)	62 (102)	57 (54)	54 (30)	57 (35)	74 (98)	98 (126)
Rehabilitated JPCP	A	7	9	7 (21)	10 (34)	9 (8)	10 (4)	9 (5)	10 (12)	11 (28)
JPCP	B	47	41	64 (74)	69 (68)	34	32	33	45	68
CBP	B–C	46	92	62 (122)	44 (121)	100	100	100	100	98
W-shape CBP	B	48	59	45 (64)	79 (64)	29	26	29	42	63
Fan setts	C–D	100	100	100 (106)	100 (94)	64	56	65	76	100
Maximum value		10.78 (m/km)	77 (10^{-5} m)	2.23 (m/s^2)	1.96 (m/s^2)	0.500 (mm/s)	0.427 (mm/s)	0.204 (mm/s)	0.070 (mm/s)	0.017 (mm/s)

Conclusiones del trabajo:

- La investigación sobre el efecto de la estructura del pavimento en la función de transferencia carretera-suelo muestra que la estructura del pavimento sólo afecta las vibraciones del suelo a distancias pequeñas y a altas frecuencias.
- Por lo tanto, las funciones de transferencia carretera-suelo están determinadas principalmente por los parámetros del suelo, de modo que una identificación precisa de las características dinámicas del suelo es crucial para la predicción de vibraciones inducidas por el tránsito.
- Los resultados se han utilizado para investigar la relación entre los indicadores de irregularidad de la carretera, como la clase de carretera ISO 8608, el IRI y el $CP_1.25$ de uniformidad por un lado, y la respuesta dinámica del vehículo y el nivel de vibración por otro lado. Los diferentes indicadores de irregularidad en la carretera generalmente producen resultados consistentes, aunque se observan algunas diferencias debido a su diferente sensibilidad en el rango considerado de longitudes de onda. Se encontró que un CP con una longitud de base relativamente corta, p. 1.25 m, es más sensible que el IRI a las longitudes de onda cortas que excitan al vehículo en el rango de frecuencia relevante para vibraciones terrestres.

4.3.2.6. The generation and propagation of vibration in various soils produced by the dynamic loading of road pavements (Watts, 1992).

En el estudio se informa de una serie de pruebas en las que se utilizó un deflectómetro de impacto FWD como fuente de vibración para investigar las propiedades de respuesta y transmisión en diferentes suelos. Los resultados muestran diferencias muy amplias en la respuesta del terreno y marcadas variaciones en las tasas de atenuación con la frecuencia. Watts muestra que el espesor y las propiedades mecánicas de las capas de la carretera tienen una pequeña influencia en las vibraciones del suelo.

Para verificar si el tipo de construcción de la carretera tiene un efecto significativo en la respuesta del suelo, se determinaron las funciones de transferencia para pavimentos de concreto y bituminosos ubicados a una distancia menor de 200 m sobre un depósito aluvial, de esta manera, las características del suelo en ambos sitios probablemente serían muy similares, por lo que cualquier gran diferencia observada se debería a diferencias en las características del pavimento. La variación resultante entre la función de transferencia con la distancia para los dos tipos de pavimento se muestra en la Figura 4.8. Se puede ver que el tipo de construcción del pavimento de la carretera parece tener un efecto relativamente pequeño en las funciones de transferencia resultantes. Esto implica que el nivel de vibración en la región de 12 Hz producido por un vehículo pesado típico cuando transita sobre una irregularidad es en gran medida independiente del tipo de construcción de la carretera. El efecto predominante se debe al tipo de suelo, que muestra claramente que las carreteras construidas en suelos blandos tienen muchas más probabilidades de producir niveles de vibración significativos en edificios cercanos a la carretera que las construidas en suelos firmes.

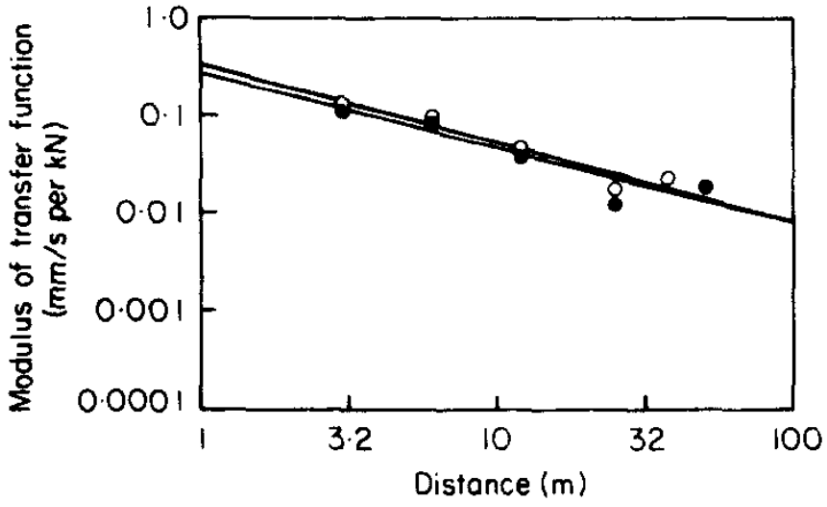


Figura 4.8: *Variación del módulo de la función de transferencia a 12 Hz para dos tipos de construcción de carretera en suelo aluvial. (círculo negro) Bituminoso (espesor 210 mm); (circulo blanco) Hormigón (espesor 260 mm).*

Fuente: Watts (1992)

El estudio concluye que los cambios en el módulo de corte son probablemente responsables de las grandes variaciones en la respuesta del suelo. Por lo tanto, los suelos rígidos tendrían una respuesta relativamente baja y los suelos blandos una respuesta relativamente alta. Esta es la clara tendencia indicada en los gráficos de los módulos de las funciones de transferencia que se muestran en la Figura 4.9, donde la turba y los suelos aluviales eran blandos y la tiza dura. Las arcillas, arenas y gravas eran de una rigidez intermedia. Esto muestra la influencia predominante del tipo de suelo.

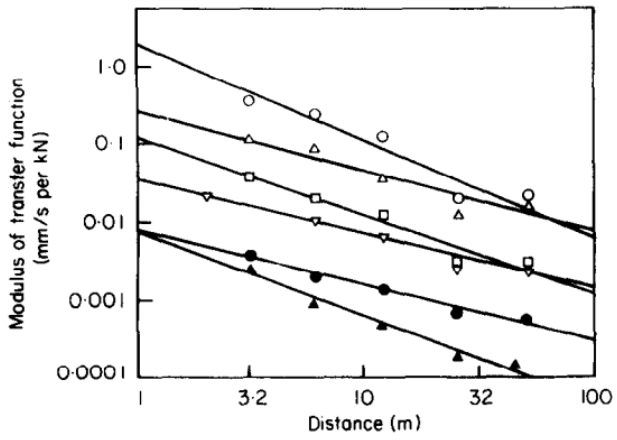


Figure 11. Variation of transfer function modulus (vertical) at 12 Hz with distance. ○, Peat; △, alluvium; □, London clay; ▽, sand; ●, Boulder clay; ▲, chalk rock.

Figura 4.9: *Variación del módulo de función de transferencia (vertical) a 12 Hz con la distancia.*

Fuente: Watts (1992)

4.3.3. Normativa Internacional

4.3.3.1. REAL DECRETO 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. (Ministerio de la Presidencia, 2007).

Se definen índices de ruido y vibraciones:

Índice de vibración: Índice acústico para describir la vibración, que tiene relación con los efectos nocivos producidos por esta.

L_{aw}*(Índice de Vibración)*: el índice de vibración asociado a la molestia, o a los efectos nocivos, producidos por las vibraciones.

Vibración: perturbación producida por un emisor acústico que provoca la oscilación periódica de los cuerpos sobre su posición de equilibrio.

"En la evaluación de las vibraciones para verificar el cumplimiento de los objetivos de calidad acústica aplicables al espacio interior de las edificaciones y lo establecido en el artículo 26, se aplicará el índice acústico L_{aw} tal como se define en el anexo I, evaluado de conformidad con lo establecido en el anexo IV".

Instrumentos de medida (Artículo 30): En la evaluación de las vibraciones por medición se deberán emplear instrumentos de medida que cumplan las exigencias establecidas en la norma UNE-EN ISO 8041:2006. «Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida».

Entidades que realizan la evaluación: Con el fin de que los resultados obtenidos en los procesos de evaluación de la contaminación acústica sean homogéneos y comparables, las administraciones competentes velarán por que las entidades encargadas de la realización de tales evaluaciones tengan la capacidad técnica adecuada. Asimismo, velarán por la implantación de sistemas de control que aseguren la correcta aplicación de los métodos y procedimientos de evaluación establecidos en este real decreto, para la realización de evaluaciones acústicas.

El índice de vibración, L_{aw} en decibelios (dB), se determina aplicando la fórmula siguiente:

$$L_{aw} = 20lg\frac{a_w}{a_0} \tag{4.3.2}$$

Siendo:

a_w : el máximo del valor eficaz (RMS) de la señal de aceleración, con ponderación en frecuencia w_m, en el tiempo t, a_w(t), en m/s^2;

a_0 : la aceleración de referencia ($a_0 = 10^{-6}$ m/s^2);

Donde:

- La ponderación en frecuencia se realiza según la curva de atenuación w_m definida en la norma ISO 2631- 2:2003: Vibraciones mecánicas y choque – evaluación de la exposición de las personas a las vibraciones globales del cuerpo – Parte 2 Vibraciones en edificios 1 – 80 Hz.
- El valor eficaz a_w(t) se obtiene mediante promediado exponencial con constante de tiempo 1s (slow). Se considerará el valor máximo de la medición aw. Este parámetro está definido en la norma ISO 2631-1:1997 como MTVV (Maximum Transient Vibration Value), dentro del método de evaluación denominado "running RMS".

Objetivos de calidad acústica:

Tabla 4.14: Objetivos de calidad acústica para vibraciones aplicables al espacio interior habitable de edificaciones destinadas a vivienda, usos residenciales, hospitalarios, educativos o culturales.

Uso del edificio	Índice de vibración L_{aw}
Vivienda o uso residencial	75
Hospitalario	72
Educativo o cultural	72

Métodos de medición de vibraciones.

Los métodos de medición recomendados para la evaluación del índice de vibración L_{aw}, son los siguientes:

a) Con instrumentos de ponderación frecuencial w_m.
Este método se utilizará para evaluaciones de precisión y requiere de un instrumento que disponga de ponderación frecuencial w_m, de conformidad con la definición de la norma ISO 2631-2:2003.
Se medirá el valor eficaz máximo obtenido con un detector de media exponencial de constante de tiempo 1s (slow) durante la medición. Este valor corresponderá al parámetro a_w, Maximum Transient Vibration Value, (MTVV), según se recoge en la norma ISO 2631-1:1997.

b) Método numérico para la obtención del indicador L_{aw}.
Cuando los instrumentos de medición no posean ponderación frecuencial y/o detector de media exponencial, o como alternativa a los procedimientos descritos en los apartados a) y c), se podrá recurrir a la grabación de la señal sin ponderación y posterior tratamiento de los datos de conformidad con las normas ISO descritas en el apartado a).

c) Calculando la ponderación frecuencial w_m.

Teniendo en cuenta que este procedimiento no es adecuado cuando se miden vibraciones transitorias (a causa de la respuesta lenta de los filtros de tercio octava de más baja frecuencia (108 s) respecto a la respuesta "slow") su uso queda limitado a vibraciones de tipo estacionario.

Cuando los instrumentos no dispongan de la ponderación frecuencial w_m se podrá realizar un análisis espectral, con resolución mínima de banda de tercio de octava de acuerdo con la metodología que se indica a continuación.

El análisis consiste en obtener la evolución temporal de los valores eficaces de la aceleración con un detector de media exponencial de constante de tiempo 1s (slow) para cada una de las bandas de tercio de octava especificadas en la norma ISO 2631-2:2003 (1 a 80 Hz) y con una periodicidad de cómo mínimo un segundo para toda la duración de la medición.

A continuación se multiplicará cada uno de los espectros obtenidos por el valor de la ponderación frecuencial wm (ISO 2631-2:2003.

En la siguiente tabla se detallan los valores de la ponderación w_m (ISO 2631-2:2003) para las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava de 1 Hz a 80 Hz.

Tabla 4.15: Ponderación w_m Ministerio de la Presidencia (2007).

Frecuencia	w_m	
Hz	factor	dB
1	0,833	-1,59
1,25	0,907	-0,85
1,6	0,934	-0,59
2	0,932	-0,61
2,5	0,910	-0,82
3,15	0,872	-1,19
4	0,818	-1,74
5	0,750	-2,50
6,3	0,669	-3,49
8	0,582	-4,70
10	0,494	-6,12
12,5	0,411	-7,71
16	0,337	-9,44
20	0,274	-11,25
25	0,220	-13,14
31,5	0,176	-15,09
40	0,140	-17,10
50	0,109	-19,23
63	0,0834	-21,58
80	0,0604	-24,38

Seguidamente se obtendrán los valores de aceleración global ponderada para los distintos instantes de tiempo (para cada espectro) mediante la siguiente fórmula:

$$a_{w,i} = \sqrt{\sum_j \left(w_{m,j} a_{w,i,j}\right)^2} \tag{4.3.3}$$

Donde:

$a_{w,i,j}$: el valor eficaz (RMS, slow) de la señal de aceleración expresado en m/s^2, para cada una de las bandas de tercio de octava (j) y para los distintos instantes de la medición (i);

$w_{m,j}$: el valor eficaz (RMS, slow) de la señal de aceleración global ponderada para los distintos instantes de la medición. Finalmente, para encontrar el valor de aw (MTVV) debe escogerse el valor máximo de las distintas aceleraciones globales ponderadas, para los distintos instantes de medición;

$$a_w = max\left\{a_{w,i}\right\}_i \tag{4.3.4}$$

Procedimientos de medición de vibraciones.

Los procedimientos de medición in situ utilizados para la evaluación del índice de vibración que establece este real decreto se adecuarán a las prescripciones siguientes:

a) Previamente a la realización de las mediciones es preciso identificar los posibles focos de vibración, las direcciones dominantes y sus características temporales.

b) Las mediciones se realizarán sobre el suelo en el lugar y momento de mayor molestia y en la dirección dominante de la vibración si esta existe y es claramente identificable. Si la dirección dominante no está definida se medirá en tres direcciones ortogonales simultáneamente, obteniendo el valor eficaz $a_{w,i}$(t) en cada una de ellas y el índice de evaluación como suma cuadrática, en el tiempo t, aplicando la expresión:

$$a_w(t) = \sqrt{a_{w,x}^2(t) + a_{w,y}^2(t) + a_{w,z}^2(t)} \tag{4.3.5}$$

c) Para la medición de vibraciones generadas por actividades, se distinguirá entre vibraciones de tipo estacionario o transitorio.

   i) Tipo estacionario: se deberá realizar la medición al menos en un minuto en el periodo de tiempo en el que se establezca el régimen de funcionamiento más desfavorable; si este no es identificable se medirá al menos un minuto para los distintos regímenes de funcionamiento.

   ii) Tipo transitorio: se deberán tener en cuenta los posibles escenarios diferentes que puedan modificar la percepción de la vibración (foco, intensidad, posición, etc.). A efectos de la aplicación de los criterios señalados en el artículo 17, apartado 1.b), en la medición se deberá distinguir entre los periodos diurno y nocturno, contabilizando el número de eventos máximo esperable.

d) En la medición de vibraciones generadas por las infraestructuras igualmente se deberá distinguir entre las de carácter estacionario y transitorio. **A tal efecto el tráfico rodado en vías de elevada circulación puede considerarse estacionario.**

   i) **Tipo estacionario: se deberá realizar la medición al menos en cinco minutos dentro del periodo de tiempo de mayor intensidad (principalmente de vehículos pesados) de circulación. En caso de desconocerse datos del tráfico de la vía se realizarán mediciones durante un día completo evaluando el valor eficaz a_w.**

   ii) Tipo transitorio: se deberán tener en cuenta los posibles escenarios diferentes que puedan modificar la percepción de la vibración (p.e: en el caso de los trenes se tendrá en cuenta los diferentes tipos de vehículos por cada vía y su velocidad si la diferencia es apreciable). A efectos de la aplicación de los criterios señalados en el artículo 17, apartado 1.b), en la medición se deberá distinguir entre los periodos diurno y nocturno, contabilizando el número de eventos máximo esperable.

e) **De tratarse de episodios reiterativos, se realizará la medición al menos tres veces, dándose como resultado el valor más alto de los obtenidos; si se repite la medición con seis o más eventos se permite caracterizar la vibración por el valor medio más una desviación típica.**

f) En la medición de la vibración producida por un emisor acústico a efectos de comprobar el cumplimiento de lo estipulado en el artículo 26 se procederá a la corrección de la medida por la vibración de fondo (vibración con el emisor parado).

g) Será preceptivo que antes y después de cada medición, se realice una verificación de la cadena de medición con un calibrador de vibraciones, que garantice su buen funcionamiento.

4.3.3.2. RIVAS Railway-Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative project - Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration (Elias and Villot, 2011).

El presente documento reseña algunos aspectos básicos de las vibraciones, estándares técnicos existentes para su medición, su descripción y una comparación entre ellos tanto para los daños en edificios como respecto de los impactos en las personas. Lo anterior siguiendo la normativa internacional y la legislación extranjera.

El análisis de las normas nacionales de diversos países (Austria, Alemania, Italia, Japón, Holanda, Noruega, España, Suecia, Reino Unido, Francia y Estados Unidos) respecto de los niveles aceptables de vibración sobre las edificaciones, arroja estos puntos centrales:

- En general, el criterio está basado en rangos de molestia subjetiva aceptable más que en límites absolutos de percepción. En contraste, los criterios de protección de ruido son derivados de los efectos de la exposición y de una proporción prevista admisible de personas molestas.
- Respecto de las categorías de vibraciones contempladas, corresponden a clases relacionadas con grado de confort o molestia, o probabilidad de molestia.
- Los límites están dados en términos de un límite máximo (por ejemplo en Noruega, España y EE.UU.). Adicionalmente, otras normativas utilizan un valor equivalente en relación con valores de tráfico permitido (Austria). En Alemania, Holanda y Suecia utilizan un sistema combinado, un valor máximo (A_0) y un criterio de orientación (A_r) que es un valor ponderado de los valores máximos.
- Respecto a los límites máximos de vibración en horario nocturno en edificios residenciales (Wm Aceleración ponderada en mm/s), el país con un mayor límite (es decir que tolera una mayor vibración en sus edificios residenciales en horario nocturno) corresponde a Suecia con 14,36 mm/s^2 en tanto el país con un menor límite máximo es EE.UU, con 3,6 mm/s^2.

Respecto de los efectos sobre la salud, las principales observaciones dan cuenta que:

- En la actualidad no habría consenso sobre un descriptor único y apropiado para medir los efectos de la exposición adversa a la vibración o respecto de los criterios adecuados para prevenir sus efectos adversos en entornos residenciales (Wong-McSweeney et al, 2016).
- Los impactos de la vibración en la residencia están bastante menos estudiados, por lo que hay menor claridad de cómo afectan a la salud humana.
- Existen diversos estudios en laboratorio que han logrado definir cuándo las vibraciones comienzan a ser percibidas y pueden llegar a ser molestas para el ser humano.

- La literatura en la materia menciona que la vibración residencial puede causar interferencia en la ejecución de ciertas tareas, como la lectura, la alimentación o descanso, y por tanto hay consecuencias a nivel fisiológico a considerar (Whittle et al. 2015).

- En relación a la interrelación entre el nivel de vibración y las molestias causadas, se ha establecido que la molestia incrementa al incrementar el nivel de vibración. Sin embargo, no hay una correlación directa. Esto podría sugerir que hay otro tipo de factores actitudinales, situacionales y demográficos que afectan la molestia producto de la exposición a vibraciones (Redel-Macías et al., 2016).

- Wong-McSweeney et al (2016) incluyeron en su investigación parámetros sobre vibraciones y auto-reportes midiendo factores como el daño a la propiedad y la aceptación de la vibración de parte del residente. Los resultados de la investigación muestran que la preocupación por el daño de la propiedad comienzan en niveles en que la vibración no es dañina para la propiedad, siendo la preocupación por el daño un importante moderador de la molestia. Por otra parte, una baja aceptación de la vibración puede afectar a ambos factores, es decir, tanto a la preocupación por los daños como a las molestias producidas por la vibración.

Análisis Comparativo de Normativas

La norma ISO 2631-2:2003 define la frecuencia ponderada w_m por la aceleración y no entrega valores límites. Esta norma proporciona curvas interdependientes, basadas en frecuencia para la aceleración y la velocidad. Los niveles aceptables de vibración están expresados mediante múltiples factores aplicados a las curvas con respecto al uso del edificio y el periodo del día a evaluar (diurno o nocturno).

En un anexo, profundiza en el fenómeno asociado con la vibración, como el ruido terrestre y ruido aéreo. Hace recomendaciones para medir los efectos del ruido trasmitido por el suelo y describir otros fenómenos. Sin embargo no se señala ningún descriptor ni procedimiento para tal evaluación.

Para las normas nacionales, los niveles de vibración aceptables definidos en los estándares nacionales tienen las siguientes características:

- En general, el criterio está basado en rangos de molestia subjetiva aceptable más que unos límites absolutos de percepción. En contraste, los criterios de protección de ruido son derivados de los efectos de la exposición con una proporción prevista admisible de personas molestas (Noruega, EE. UU.).

- Respecto de las categorías de vibraciones contempladas, corresponden a clases relacionadas con grado de confort o molestia, o probabilidad de molestia.

    - Austria: dos clases (satisfactoria y buena);
    - Noruega: cuatro clases (muy buenas, buenas, moderadas, probables);
    - Reino Unido: tres clases (baja probabilidad, posibles, probables comentarios adversos);

  - Suecia: dos clases (molestia moderada y probable).

- Los límites están dados en términos de un límite máximo como en Noruega, Suecia, España y los Estados Unidos; en otros se utiliza un valor equivalente, en términos de valores equivalentes orientados solamente al tránsito como en el Reino Unido, o en términos de máximos y valores orientados al tránsito permitido como en Austria. En Alemania, Holanda y Suiza utilizan un sistema combinado, un valor máximo (A_0) y un criterio de orientación (A_r) que es un valor ponderado de los valores máximos.

- Los criterios de vibraciones aceptables, comparados en una unidad de aceleración en la noche para edificios residenciales, que representan el nivel de molestia aceptable en los países considerados hasta la fecha, entrega los siguientes resultados:

Tabla 4.16: Criterios de vibración en horario nocturno en edificios residenciales (w_m aceleración ponderada en mm/s^2).

Country and quality class	Austria		Germany	Italy	Norway		Spain	Sweden	UK	USA	ISO 2631-2 (1989)
	Satisf.	Good			Class C	Class B					
Maximum value	18.8	9.4	7.1	7.0	11	5.4	5.6	14-36	10	3.6	5.4
Equivalent value	1.59	0.84	1.8	–	–	–	–	–	0.5	–	–

Comments:
• The relationship used between acceleration and velocity is: $a_w = 35.7\ v_w$.
• Austria: assessment with exposure corresponding to $a_{w,s} > 3{,}57$ mm/s².
• Germany:
  – time constant: Fast;
  – assessment with exposure corresponding to $KB > 0.1$ mm/s².
• Norway: the assessment quantity is the statistical 95-percentile value (a more stringent criterion than the maximum measured value).
• United Kingdom:
  – 8 occurences at night-time, each of duration $t = 10$ s;
  – $eVDV = 1.4 \times a(t)_{r.m.s.} \times t^{0.25} = 0.1\ \text{m.s}^{-1.75}$;
  – the calculated constant value (10 mm/s²) is an average r.m.s. acceleration over a train passage, thus underestimating the actual maximum value.

Para las cifras de la Tabla 4.16 debe considerarse que los criterios de vibración pueden tener significados opuestos, dependiendo de si apuntan a calificar la molestia aceptable de eventos de vibración única o la molestia aceptable de la exposición repetida a la vibración.

4.4. Indicadores técnicos para evaluar vibraciones en carreteras

Es necesario definir un indicador que sea útil, práctico y aplicable tal que permita relacionar directamente el fenómeno de las vibraciones generadas por el tránsito que circula por la carretera, con el modelo de evaluación que posiblemente se pueda implementar. Se realiza una búsqueda en la literatura para un posterior análisis de cada una de las alternativas.

4.4.1. Velocidad máxima de partículas (PPV)

La velocidad máxima de partículas, PPV, es el peak máximo instantáneo positivo o negativo de la señal de vibración. El PPV se usa a menudo en el monitoreo de vibraciones de construcción (como voladuras), ya que está relacionado con las tensiones que experimentan los edificios y no se usa para evaluar la respuesta humana (Federal Transit Administration, 2018).

El PPV se describe en pulgadas por segundo en los Estados Unidos y en metros por segundo a nivel internacional (Federal Transit Administration, 2018).

4.4.2. Media cuadrática (Root Mean Square, RMS)

La RMS es una medida de la amplitud de la vibración y da cuenta del contenido energético de la vibración, y por tanto con su capacidad destructiva (Elias and Villot, 2011).

Como el promedio neto de una señal de vibración es cero, la amplitud RMS se utiliza para describir la amplitud de vibración suavizada. La RMS de una señal es la raíz cuadrada de la media de la amplitud al cuadrado de la señal (Federal Transit Administration, 2018).

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + ... + x_N^2}{N}} \tag{4.4.6}$$

El promedio se calcula típicamente en un período de un segundo (constante de tiempo lenta). En Alemania y en las normas que usan como referencia la DIN 4150-2 el período es de 0.125 segundos. Japón, en tanto, utiliza una constante de tiempo intermedia de 0.63 segundos (Elias and Villot, 2011).

La amplitud RMS es siempre menor que la PPV y siempre es positiva. Una de las aplicaciones de la amplitud RMS es transmitir la magnitud de la señal de vibración que siente el cuerpo humano (Federal Transit Administration, 2018).

4.4.2.1. Velocidad cuadrática media

Utilizada en Alemania, Francia, Suiza, EE.UU., Noruega y Suecia. La velocidad RMS se describen en pulgadas por segundo en los Estados Unidos y en metros por segundo a nivel internacional (con varios valores de referencia diferentes). Aunque no es universalmente aceptado, la vibración se expresa comúnmente en notación de decibeles.

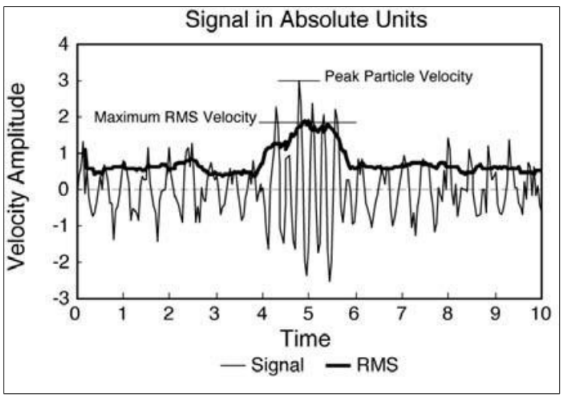


Figura 4.10: *Señal de vibración en unidades absolutas*

Fuente: Federal Transit Administration (2018)

4.4.2.2. Aceleración cuadrática media

La aceleración es la unidad básica para medir la magnitud de la vibración según el estándar ISO y es usada también en Austria, Italia, España y Reino Unido. La aceleración RMS se describen en metros por segundo a nivel internacional.

4.4.3. Niveles de vibración

4.4.3.1. Nivel de velocidad de vibración

Aunque no es universalmente aceptado, la vibración se expresa comúnmente en notación de decibeles. La escala de decibeles comprime el rango de números necesarios para describir la vibración, con varios valores de referencia diferentes (Federal Transit Administration, 2018).

La gráfica de la Figura 4.11 se muestra la curva RMS de la Figura 4.10 expresada en decibeles. El nivel de velocidad de vibración en decibeles se define como:

$$L_v = 20 \cdot log\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \tag{4.4.7}$$

Donde:

L_v : nivel de velocidad, VdB (decibeles de vibración).
v : amplitud de velocidad RMS.
v_{ref} : $\begin{cases} 1 \cdot 10^{-6} & \text{pulg/s en Estados Unidos} \\ 1 \cdot 10^{-8} & \text{m/s en Estados Unidos} \\ 1 \cdot 10^{-6} & \text{m/s internacionalmente} \end{cases}$

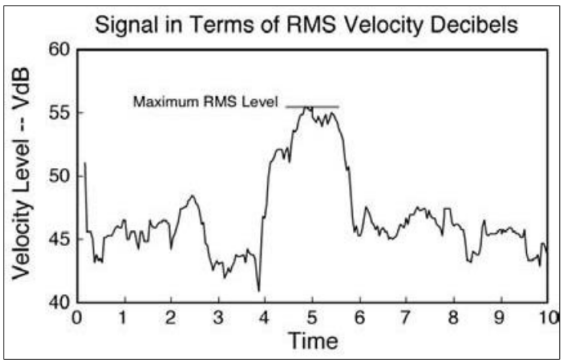


Figura 4.11: *Señal en términos de decibeles de velocidad RMS*

Fuente: Federal Transit Administration (2018)

4.4.3.2. Nivel de aceleración de vibración

El nivel de aceleración de vibración en decibeles se define como:

$$L_a = 20 \cdot log\left(\frac{a}{a_{ref}}\right) \tag{4.4.8}$$

Donde:

L_a : nivel de aceleración, VdB (decibeles de vibración).
a : amplitud de aceleración RMS.
a_{ref} : $\begin{cases} 1 \cdot 10^{-6} & m/s^2 \text{ internacionalmente} \\ 1 \cdot 10^{-5} & m/s^2 \text{ en Japón} \end{cases}$

4.5. Elección del indicador técnico más apropiado

La vibración es un movimiento oscilatorio que se puede describir en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración. Debido a que el movimiento es oscilatorio, no hay movimiento neto del elemento de vibración y el promedio de cualquiera de las métricas de movimiento es cero. El desplazamiento es la métrica más intuitiva. Para un piso vibrante, el desplazamiento es simplemente la distancia que un punto en el piso se aleja de su posición estática. La velocidad representa la rapidez instantánea del movimiento del piso y la aceleración es la razón de cambio de la velocidad (Federal Transit Administration, 2018).

Aunque el desplazamiento es más fácil de entender que la velocidad o la aceleración, rara vez se usa para describir la vibración del suelo. La mayoría de los transductores utilizados para medir la vibración transmitida por el suelo utilizan velocidad o aceleración (Federal Transit Administration, 2018).

Además, la respuesta de los humanos, los edificios y los equipos a la vibración se describe con mayor precisión utilizando la velocidad o la aceleración (Federal Transit Administration, 2018).

Por estos motivos, se escoge como indicador técnico a la velocidad de vibración, indicador ya utilizado en el Manual de Carreteras del MOP y múltiples normativas internacionales como la alemana, holandesa, noruega y estadounidense.

4.6. Propuesta para vibraciones en pavimento para carreteras concesionadas en Chile

Considerando que:

1. Las investigaciones muestran que los niveles de vibración causadas por el tránsito en carreteras no son consideradas como un problema para la salud ni la seguridad de las estructuras, siendo su estudio una preocupación por las molestias que pudieran generar en quienes residen en su cercanía, al causar interferencia al realizar tareas como lectura, descanso, etc. No obstante es poco probable que los vehículos que operan en una carretera causen un nivel perceptible de vibración.
2. A menudo, se piensa erróneamente que la vibración de elementos de construcción livianos, como las ventanas, se debe a la vibración en el suelo producto del tránsito que viaja hacia el edificio a través de los cimientos. Sin embargo, este fenómeno se debe generalmente a las emisiones de ruido de baja frecuencia en el aire, generalmente de vehículos pesados y autobuses, que hacen que los elementos de construcción livianos vibren.
3. De los factores que se han identificado como fuentes de vibración en carreteras, el único atribuíble a la gestión del Concesionario corresponde a la regularidad longitudinal del pavimento, condiciones de la superficie de la carrera en cuanto a irregularidades significativas, como baches, protuberancias, juntas de expansión u otras discontinuidades podrían causar vibraciones.
4. Lo indicado por el Manual de Carreteras corresponde a los límites más restrictivos (tolera una menor vibración) dentro de todas las investigaciones y normativas verificadas (valores proporcionados por la FTA de los Estados Unidos).

Se propone:

1. Conservar los límites y metodologías asociadas a vibraciones indicados en el Manal de Carreteras por lo menos hasta que exista una actualización de algún estándar que indique mayor restricción.
2. No incorporar el fenómeno de vibraciones como activo dentro del modelo para evaluar su desempeño en la concesión.
3. Generar mapas de vibraciones, utilizando el modelo empírico de la FTA (al cual hace referencia el Manual de Carreteras), identificando los posibles sectores vulnerables cada vez que se licite o relicite un proyecto vial.
4. Los mapas de vibraciones deben estar disponibles para su evaluación en nuevos proyectos a realizarse en las zonas adyacentes a la carretera en cuestión, de manera que se verifique y estudie su posible impacto.

CONCLUSIONES

El desarrollo del trabajo de memoria resolvió las temáticas planteadas, tanto para la capacidad estructural de activo plataforma vial, como para el activo paraderos y el fenómeno de vibraciones generadas por el tránsito vial, se propusieron soluciones que aspiran a la mejora de la gestión de nuestras redes viales concesionadas alcanzando cada uno de los objetivos planteados, tal como se detalla a continuación.

Capacidad Estructural de pavimentos

Toda la investigación relacionada al activo de Capacidad Estructural, dejó como resultado, proceder a través de un análisis de deflectometría para la evaluación de este, debido a las amplias aplicaciones del parámetro deflexión, tanto en pavimentos flexibles como también en pavimentos rígidos. Es posible relacionarlo directamente con el estado de las estructuras, resultando una metodología sencilla y práctica para los organismos controladores. Metodologías mecanicistas proporcionarían información mas precisa del comportamiento de las estructuras viales, pero no sería a través de un parámetro que pueda evaluarse directamente a través de la medición de un indicador.

Para la evaluación de la capacidad estructural se adoptó para pavimentos flexibles un análisis multicapas y en términos de eficiencia de traspaso de carga para pavimentos rígidos. Ambas metodologías centradas en el análisis de deflectometría pero con indicadores adecuados a cada uno de ellos. Se establecieron como indicadores técnicos para evaluar capacidad estructural en pavimentos flexibles, la deflexión máxima (D_0) y los índices de capa base (BLI), capa media (BLI) y capa inferior (LLI); para el caso de los pavimentos rígidos, se adoptó el indicador de la transferencia de carga (TC %).

Toda la información requerida para la evaluación de la capacidad estructural de un pavimento en concesión deberá levantarse a través de un equipo FWD y bajo procedimientos ya establecidos en el Manual de Carreteras. Este equipo reúne características de operación, costo, versatilidad y precisión que lo hacen atractivo para los intereses de este proyecto.

En cuanto a los procedimientos de evaluación, se establecieron y definieron en función de estándares y experiencias internacionales para un correcto seguimiento y control del comportamiento de los pavimentos, ajustando las metodologías a lo ya establecido en el propio Manual de Carreteras en un nivel adecuado a las exigencias propuestas. Umbrales y nivel de desempeño de los indicadores resultaron del intercambio de información entre profesionales del área, seguimientos a pavimentos realizados por el IDIEM y Laboratorio Nacional de Vialidad, considerando las sugerencias o experiencias de la

literatura internacional. Los indicadores D_0 y TC % son parte de las exigencias a establecer en los nuevos contratos de licitaciones de proyectos viales, mientras que los valores medidos de BLI, MLI y LLI deberán ser informados para realizar, de ser necesario, ajustes y concretar una correcta incorporación a las exigencias a cumplir por el concesionario.

Se tiene conciencia de que la metodología de evaluación de la capacidad estructural en base al parámetro de deflexión puede no ser lo más preciso en contraste a las metodologías mecanicistas, parte de ello se pretende mejorar a través del seguimientos de todos los indicadores propuestos a esperas de mejoras en la calibración del modelo presentado. Abordar la metodología de evaluación a través de técnicas mecanicistas proporcionaría más herramientas de proyección del comportamiento del pavimento, las cuales son útiles y de gran interés para el dueño del activo, mas no se pretende realizar un seguimiento para gestionar las estrategias de conservación, sólo un control fiscalizador a la calidad del pavimento a través de un parámetro sencillo y práctico.

La incorporación del activo Capacidad Estructural al modelo por niveles de servicio se considera al menos como un punto de partida para el control y seguimiento de estos indicadores, que por su relevancia al valor y conservación del patrimonio de la concesión resulta impensado no incorporarlo e implementarlo en las nuevas bases de licitación.

Serviciabilidad de Paraderos

En lo que respecta al activo paraderos, se logró generar una metodología de evaluación del servicio prestado por estos, acorde a lo sugerido por literatura internacional de acuerdo a la funcionalidad e integridad de las instalaciones, cuyo nivel de desempeño se ajusta a las necesidades de la comunidad aledaña.

Como indicador se desarrolló un contador de incumplimientos mensuales de las exigencias establecidas a cumplir, cuya inspección se realizará mediante inspección visual y olfativa, otorgando a la vez, plazos de restauración acordes al tipo de incumplimiento detectado. El indicador se diseñó de manera que resulte fácil de calcular e interpretar.

Su incorporación protege los intereses tanto del patrimonio de la concesión, por concepto de las exigencias de integridad de los paraderos, como también los de la comunidad aledaña, quien requiere de la preocupación de la integridad como la funcionalidad de estos. A diferencia de otras bases de licitación, el indicador de paraderos se incorpora independizado de otras instalaciones que se encuentran en las concesiones, otorgando mayor relevancia a este activo.

Vibración en pavimentos generada por el tránsito

Se verificó que el fenómeno de vibraciones en carreteras producto del paso del tránsito, es evaluado y considerado en estudios de anteproyecto, cuyas exigencias y límites están a la vanguardia de los límites sugeridos por estándares internacionales. Por esta razón los niveles de vibración generados por el tránsito, debiesen estar controlados al momento de la operación de la carretera, no son consideradas como un problema para la salud ni la integridad de las estructuras, es poco probable que se alcance un nivel perceptible en lo que respecta a carreteras concesionadas en donde no debieran existir irregularidades significativas en el pavimento, como baches, protuberancia o discontinuidades que puedan causar vibraciones. Por lo que no es necesaria la evaluación del desempeño de este aspecto de la infraestructura vial.

A modo de asegurar una buena operación de la concesión en términos de vibración, que proteja la calidad de vida de la comunidad aledaña, se sugiere incorporar los estudios a mapas de vibración de manera que se considere su impacto ante posibles nuevos proyectos a realizarse en los alrededores de la carretera.

REFERENCIAS

AASHTO (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide; Guide, Empirical Pavement Design. A manual of Practice.* Estados Unidos.

Austroads (2008). *Guide to Asset Management Part 5D: Strength.* Australia.

Austroads (2015a). *A Common Data Output Specification Technical Report AP-T290-15.* Sydney, Australia.

Austroads (2015b). *Guide to Road Design Part 6B: Roadside Enviroment.* Sydney, Australia.

Cabrera, C. (1998). Memoria para optar al título de Ingeniero Civil - Calibración del modelo de agrietamiento para pavimentos de hormigón simple implementado en el sistema GIMPh. Master's thesis, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Chan, S. and Lane, B. (2005). *Falling Weight Deflectometer (FWD) Testing Guideline; MERO Report #19.* Ministry of Transportation. Materials Engineering and Research Report. Ontario, Canadá.

Consorcio de Rehabilitación Vial (1982). *Estudio de Rehabilitación de Carreteras en el País.* Perú.

Contreras, R. A. (2015). *Deflectometría.* Dirección de Vialidad, Laboratorio Nacional, Subdepartamento de Auscultaciones y Prospecciones. Chile.

Department of Environment, C. C. and NSW, W. (2011). *NSW Road Noise Policy.* Sydney, Australia.

Department of Transport Republic of Souh Africa (1997). *TRH12: Flexible Pavement Rehabilitation, Investigation and Design.* Pretoria, Sudáfrica.

Dirección de Vialidad (2017). *Manual de Carreteras, Volumen N°9 Estudio y Criterios ambientales en proyectos viales.* Chile.

Dirección de Vialidad (2018a). *Manual de Carreteras, Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño.* Chile.

Dirección de Vialidad (2018b). *Manual de Carreteras, Volumen N°8 Especificaciones y Métodos de muestreo, ensaye y control.* Chile.

Elias, P. and Villot, M. (2011). *RIVAS Railway-Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative project - Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration.* Unión Europea.

European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research (2007). *COST 354 Performance Indicators for Road Pavements WP 2: "Individual Performance Indicators".*

Federal Highway Administration (2006). *LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements, Version 4.1.* Estados Unidos.

Federal Highway Administration (2008). *Pedestrian Safety Guide for Transit Agencies.* Estados Unidos.

Federal Highway Administration (2011). *Falling Weight Deflectometer Calibration Center and Operational Improvements: Redevelopment of the Calibration Protocol and Equipment.* Estados Unidos.

Federal Highway Administration (2012). *Simplified Techniques for Evaluation and Interpretation of Pavement Deflections for Network-Level Analysis.* Estados Unidos.

Federal Transit Administration (2018). *Transit Noise and Vibration Impact Assement Manual.* Estados Unidos.

Flintsch, G., Katicha, S., Bryce, J., Ferne, B., Nell, S., and Diefenderfer, B. (2013). *Assessment of Continuous Pavement Deflection Measuring Technologies (No. SHRP 2 Report S2-R06-RW-1).* Estados Unidos.

García, G. (sf). *Impulse deflection testing for structural evaluation of flexible pavements.* Illinois, Estados Unidos.

Geocisa (2014). *Gestión de Carreteras.*

Greenwood Engineering (2018). *Traffic Speed Deflectometer.*

Horak, E. (2008). *Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters.* Sudáfrica.

Horak, E. and Emery, S. (2006). *Falling weight deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavemet structural evaluations.* Sudáfrica.

Horak, E., Hefer, A., Steve, E., and Maina, J. (2015). *Flexible road pavement structural condition benchmark methodology incorporating structural condition indices derived from Falling Weight Deflectometer deflection bowls.* Sudáfrica.

Hunaidi, O. (2000). *Traffic Vibrations in Buildings.* Canadá.

IDIEM (2001). *Seguimiento de Pavimentos de Hormigón II.* Santiago, Chile.

Lak, M. A., Degrande, G., and Lombaert, G. (2011). *The effect of road unevenness on the dynamic vehicle response and ground-borne vibrations due to road traffic. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31(10), 1357-1377.*

LanammeUCR (2009). *Informe de Asesoría UI-PE-03-09 - Análisis del Diseño Estructural del Pavimento Propuesto en la Concesión de la carretera San José-Caldera.* Costa Rica.

Ministerio de Fomento (2003). *Norma 6.3 IC: "Rehabilitación de firmes, de la instrucción de carreteras".* Madrid, España.

Ministerio de Fomento (2007). *Pliego de cláusulas administrativas particulares.* España.

Ministerio de la Presidencia (2007). *Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.* España.

Ministerio de Obras Públicas (2010). *Instructivo de Inspección Visual de Caminos Pavimentados.* Chile.

Ministerio de Obras Públicas (2012). *Base de Licitación - Concesión para el mejoramiento y conservación de la Ruta 43 de la Region de Coquimbo.* Chile.

Ministerio de Obras Públicas (2015). *Bases de Licitación, Relicitación Concesion Camino Nogales Puchuncaví.* Chile.

Ministerio de Obras Públicas (2017). *Bases de Licitación Concesión Vial Mejoramiento Ruta G-21.* Chile.

Ministerio de Obras Públicas (2018). *Concesión Ruta 5 Tramo Los Vilos - La Serena.* Chile.

Ministerio de Transporte (2007). *E-798-07 Método para medir deflexiones mediante el deflectómetro de impacto (FWD).* Colombia.

Ministerio de Transporte (2008). *Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras.* Bogotá, Colombia.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013a). *Manual de Carreteras "Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013".* Lima, Perú.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013b). *Manual de Carreteras "Suelos, Geología, Geotencia y Pavimentos" Sección: Suelos y Pavimentos.* Lima, Perú.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016a). *Manual de Ensayo de Materiales.* Lima, Perú.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016b). *Manual de Ensayo de Materiales MTC-E-1002 Medida de deflexión de un pavimento flexible empleando la Viga Benkelman.* Lima, Perú.

Ministry of Transportation (2013). *Pavement Design and Rehabilitation Manual.* Downsview, Ontario, Canadá.

Schmalzer, P. N. (2006). *LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements (FHWA-HRT-06-132).* Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development. Estados Unidos.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2017a). *Manual M-MMP-4-07-020 Determinación de las Deflexiones con Equipo de Impacto.* México.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2017b). *Norma N-CSV-CAR.1-03-010/17 Determinación de las Deflexiones de un Pavimento.* México.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2018). *Licitación Pública Internacional Número APP-009000959-E12-2018.* México.

South African National Roads Agency SOC Ltd. (2014a). *South African Pavement Engineering Manual Chapter 10 Pavement Desing.* Sudáfrica.

South African National Roads Agency SOC Ltd. (2014b). *South African Pavement Engineering Manual Chapter 6 Road Prism and Pavement Investigations.* Sudáfrica.

Transportation Research Board of the National Academies (1996). *TCRP Report 19: Guidelines for the Location and Design of Bus Stops.* Washington D.C., Estados Unidos.

Vacca, H., Rodríguez, J. A., and Ruiz, D. (2011). *Medición e interpretación de vibraciones producidas por el tráfico en Bogotá DC. Revista ingeniería de construcción, 26(1), 61-80.* Colombia.

Watts, G. R. (1992). *The generation and propagation of vibration in various soils produced by the dynamic loading of road pavements. Journal of Sound and Vibration, 156(2), 191-206.*

Zárate Aquino, M., Lucero Arellano, M. R., and Zárate Orozco, B. (2010). *Aspectos Importantes derivados de la utilización del deflectómetro de impacto HWD, aplicados para la rehabilitación o reconstrucción de los pavimentos flexibles.* México.