

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL



Tesis

**Evaluación estructural de pavimentos mediante Deflectómetro de Impacto en la vía
expresa Cusco, 2025**

Asesor:

Ph.D. Vásquez Ramírez, Abbon Alex

Autor:

Coaquira Quispe, Richard Daniel

Para optar el Título Profesional: Ingeniero Civil

Abancay-Apurímac-Perú

2025

Acta de sustentación



Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 077

En la ciudad de Abancay, a los diecisiete días del mes de **diciembre del 2025**, siendo las **8:30 am** horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° **1042-2025- EPIC-FI-UTEA-SA** de fecha **10 de diciembre del 2025**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mag. Huanca Astoquillca, Luis
Dictaminante :	Ing. Cayo Baca, Holguer
Replicante :	Mag. Roldan Juárez, Américo

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Evaluación estructural de pavimentos mediante Deflectómetro de Impacto en la vía expresa Cusco, 2025

Desarrollado por las (los) Bachilleres (es):

Br: Coaquira Quispe, Richard Daniel

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) **APROBADO (S)**:

Por: Unanimidad

(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Coaquira Quispe, Richard Daniel	Aprobado

Siendo las **10:30am horas** concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. Huanca Astoquillca, Luis

(.....)

Dictaminante: Ing. Cayo Baca, Holguer

(.....)

Replicante: Mag. Roldan Juárez, Américo

(.....)

Abancay 22 de diciembre del 2025

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 382

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
Ciudad Universitaria Av. Perú N° 700, Abancay, Central Telefónica 051 (083) 321559
Filial Cusco, Av. Grau N° 516, Teléfono (084) 251565
Filial Andahuaylas, Av. Juan Antonio Trelles N° 513 Teléfono (083) 421752
www.utea.edu.pe

(*): Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art. 18 RGGAT.
(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

Reporte de similitud

richard Coaquira

COAQUIRA QUISPE_RICHARD DANIEL_INGENIERÍA CIVIL (1)

 Revisión-tesis-C/D

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:544265631

Fecha de entrega

5 ene 2026, 13:07 GMT-5

Fecha de descarga

5 ene 2026, 13:15 GMT-5

Nombre del archivo

COAQUIRA QUISPE_RICHARD DANIEL_INGENIERÍA CIVIL (1).docx

Tamaño del archivo

4.9 MB

123 páginas

44.539 palabras

211.553 caracteres



Página 2 de 135 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid:::3117:544265631




8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Coaquira Quispe, Richard Daniel
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	41082165
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0007-1863-4254
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Ph.D. Vásquez Ramírez, Abbon Alex
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	06532658
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-7299-5367
Datos de la investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de Investigación	:	Gestión de la infraestructura para el desarrollo Sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	:	2025
Fuente de financiamiento	:	Propia
Porcentaje de similitud	:	8%
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A mis padres Daniel e Isidora,
mi esposa Tania e hija Karla y
hermanos por su inmenso apoyo en
mi formación académica y lograr mis
objetivos.

Coaquira Quispe, Richard Daniel

Agradecimientos

Agradezco a Dios por acompañarme en cada paso, por darme la fortaleza y sabiduría para seguir adelante.

Agradezco a padres Daniel e Isidora, mi esposa Tania e hija Karla y hermanos por su inmenso apoyo en mi formación académica y lograr mis objetivos.

A mis docentes y compañeros por compartir conocimientos y enseñanzas en el transcurso de mi formación académica.

Coaquira Quispe, Richard Daniel

Resumen

La tesis “Evaluación estructural de pavimentos mediante deflectómetro de impacto en la Vía Expresa Cusco 2025” aborda el problema de determinar la capacidad estructural del pavimento de la Vía Expresa Cusco ante el tránsito proyectado, contrastando la respuesta real con parámetros normativos. Objetivo principal: evaluar la capacidad estructural del pavimento mediante ensayos de deflexión y su verificación frente a umbrales nacionales e internacionales. Metodología: estudio aplicado, de nivel explicativo–correlacional, con enfoque cuantitativo y diseño no experimental, transversal; se emplearon como técnicas la medición de deflexiones en campo y el análisis computacional, utilizando como instrumentos la viga Benkelman (VB) y el deflectómetro de impacto (FWD), además del software WINDEPAV y la validación con el método CONREVIAl. Resultados: en los tramos A1 (0+000–2+800 km) y B1 (2+800–5+190 km) se ejecutaron >200 ensayos; en la vía derecha se obtuvieron promedios de 13×10^{-2} mm (A1) y 15×10^{-2} mm (B1), muy por debajo del umbral WINDEPAV de 23×10^{-2} mm; el 100 % de ensayos quedó bajo la deflexión admisible con >95 % de confiabilidad; con FWD y CONREVIAl se obtuvieron deflexiones características de 18×10^{-2} mm (A1) y 21×10^{-2} mm (B1), menores a los límites nacionales de 36 y 40×10^{-2} mm; el ESAL proyectado fue 66.7×10^6 (A1) y 47.1×10^6 (B1). Conclusión: la vía exhibe holgura estructural y desempeño uniforme, apta para las cargas previstas.

Palabras clave: deflectómetro de impacto, viga Benkelman, pavimentos, capacidad estructural del pavimento.

Abstract

The thesis “Structural Evaluation of Pavements Using an Impact Deflectometer on the Cusco Expressway 2025” addresses the problem of determining the structural capacity of the Cusco Expressway pavement under projected traffic, comparing the actual response with regulatory parameters. Main objective: to evaluate the structural capacity of the pavement through deflection tests and their verification against national and international thresholds. Methodology: applied study, explanatory-correlational level, with a quantitative approach and a non-experimental, cross-sectional design; the techniques used were field deflection measurements and computational analysis, using the Benkelman Beam (VB) and the Impact Deflectometer (FWD) as instruments, in addition to the WINDEPAV software and validation with the CONREVIAL method. Results: in sections A1 (0+000–2+800 km) and B1 (2+800–5+190 km) >200 tests were performed; On the right-hand track, average deflections of 13×10^{-2} mm (A1) and 15×10^{-2} mm (B1) were obtained, well below the WINDEPAV threshold of 23×10^{-2} mm; 100% of the tests remained below the allowable deflection with >95% confidence; with FWD and CONREVIAL, characteristic deflections of 18×10^{-2} mm (A1) and 21×10^{-2} mm (B1) were obtained, lower than the national limits of 36×10^{-2} mm and 40×10^{-2} mm; the projected ESAL was 66.7×10^6 (A1) and 47.1×10^6 (B1). Conclusion: the track exhibits structural clearance and uniform performance, suitable for the expected loads.

Keywords: impact deflectometer, Benkelman beam, pavements, pavement structural capacity

Índice general

Portada	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice general	ix
Índice de tablas	xi
Índice de figuras	xii
Índice de anexos	xiii
I. Introducción	14
II. Planteamiento del problema	16
2.1 Descripción y formulación del problema	16
2.2 Objetivos.....	18
2.2.1 Objetivo General	18
2.2.2 Objetivos Específicos	18
2.3 Justificación e importancia	18
2.4 Hipótesis	19
2.5 Variables	20
III. Marco Teórico	22
3.1 Antecedentes.....	22

3.2 Bases teóricas.....	28
3.3 Definición de términos	56
IV. Metodología.....	59
4.1 Tipo y nivel de investigación.....	59
4.2 Ámbito temporal y espacial	61
4.3 Población y muestra.....	61
4.4 Instrumentos	62
4.5 Procedimientos	63
4.6 Análisis de Datos	64
4.7 Consideraciones Éticas	65
V. Resultados y discusión	66
VI. Conclusiones	95
VII. Recomendaciones	97
VIII. Referencias.....	99
IX. Anexos	106

Índice de tablas

Tabla 1	Operacionalización de variables	21
Tabla 2	Deflexión Característica según tipo de carretera	34
Tabla 3	Módulo de la Subrasante.....	48
Tabla 4	Factor de corrección.....	49
Tabla 5	Número estructural de diseño	51
Tabla 6	Factores de Corrección “C”, para el Retrocálculo	68
Tabla 7	Deflexiones máximas permisibles	69
Tabla 8	Planilla de deflexiones y retrocálculo–AASHTO93–vía derecha	71
Tabla 9	Planilla de Deflexiones y Retrocálculo–AASHTO93–Vía Principal izquierda ..	76
Tabla 10	Ensayos de campo CBR.....	81
Tabla 11	Resumen de la Evaluación de Parámetros Estructurales–Vía Principal Derecha	81
Tabla 12	Resumen de la Evaluación de Parámetros Estructurales–Vía Principal izquierda	83
Tabla 13	Evaluación Estructural por Deflexiones – Vía Principal izquierda	86
Tabla 14	Comparativa entre Deflexión viga Benkelman y Deflexión Admisible WINDEPAV.....	88
Tabla 15	Validación de ensayos por Deflexión Admisible – Método WINDEPAV	88
Tabla 16	Comparativa entre Deflexión Característica y Deflexión Admisible (CONREVIAL)	89
Tabla 17	Validación de ensayos por Deflexión Admisible – Método CONREVIAL	90

Índice de figuras

Figura 1	Evaluación estructural de pavimentos.....	28
Figura 2	Comportamiento de deflexión de una carretera rígida y una flexible.....	33
Figura 3	Correlación de EE con Deflexión Admisible y Deflexión Crítica.....	35
Figura 4	deflectómetro de impacto (FWD).....	38
Figura 5	Deflexión por cargas móviles.....	40
Figura 6	Esquema del cuenco de deflexiones ante el impacto del deflectómetro.....	44
Figura 7	Cargas existentes en un pavimento flexible.....	53
Figura 8	Efecto de la deflexión en un pavimento.....	56
Figura 9	Esquema típico de la vía en evaluación.....	67
Figura 10	Esquema del cuenco de deflexiones ante el impacto del deflectómetro.....	68
Figura 11	Módulo Resiliente de la Subrasante – Vía Principal Derecha.....	82
Figura 12	Módulo Equivalente del Pavimento – Vía Principal Derecha.....	82
Figura 13	Número Estructural Efectivo – Vía Principal Derecha.....	83
Figura 14	Módulo Resiliente de la Subrasante – Vía Principal Izquierda.....	84
Figura 15	Módulo Equivalente del Pavimento – Vía Principal Izquierda.....	84
Figura 16	Número Estructural Efectivo – Vía Principal Izquierda.....	85
Figura 17	Evaluación Estructural por Deflexiones – Vía Principal Derecha.....	85
Figura 18	Deflexión Máxima – Vía Principal Derecha.....	86
Figura 19	Deflexión Máxima – Vía Principal Izquierda.....	87
Figura 20	Deflectograma de la Vía Principal Derecha – Umbral Método CONREVIAl	91
Figura 21	Deflectograma de la Vía Principal Izquierda – Umbral Método CONREVIAl	92

Índice de anexos

Anexo 1 Matriz de Consistencia.....	107
Anexo 2 Matriz de Operacionalización de variables.....	108
Anexo 3 Panel fotográfico.....	109
Anexo 4 Ensayos de la laboratorio - CBR.....	112
Anexo 5 Resultados de deflexiones deflectómetro de impacto.....	114

I. Introducción

En el ámbito internacional la evaluación estructural de pavimentos es una actividad clave para la gestión vial moderna porque permite estimar la capacidad portante real de una estructura existente y sustentar decisiones de conservación, refuerzo o rehabilitación con base técnica, entre los métodos no destructivos más utilizados se encuentra el deflectómetro de impacto (FWD), cuyo análisis se apoya en la medición del cuenco de deflexiones para caracterizar la respuesta del paquete estructural frente a cargas dinámicas. La literatura técnica reporta que los datos de FWD, combinados con procedimientos de retrocálculo, brindan una vía rápida y confiable para estimar propiedades in situ de capas y soporte de subrasante, y así integrar el diagnóstico a procesos de diseño y evaluación mecánico - empíricos (Federal Highway Administration [FHWA], 2017).

El marco técnico peruano reconoce la necesidad de controlar el desempeño de capas de soporte mediante ensayos que no se limiten a densidades o compactación, sino que verifiquen su respuesta mecánica, en esa línea. El manual de carreteras especificaciones técnicas generales para construcción (EG-2013) establece la aplicación de deflectometría como parte del control de calidad, indicando mediciones con viga Benkelman, FWD u otro equipo confiable, con el propósito de identificar puntos con baja resistencia y estimar parámetros como el módulo resiliente para aplicar correctivos oportunos antes de continuar con las capas superiores. Este enfoque refuerza que el control estructural no es “opcional”, sino un componente técnico para asegurar calidad y durabilidad en obras viales (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2013).

En el contexto local, la vía expresa Cusco es una infraestructura urbana estratégica por su impacto en conectividad, seguridad y operación del tránsito; por ello, cualquier deficiencia constructiva o de calidad eleva el riesgo de deterioro prematuro y mayores costos de conservación. De hecho, entidades de control han advertido públicamente la

existencia de observaciones y situaciones que requieren atención durante la ejecución de esta obra, lo que incrementa la necesidad de respaldar técnicamente la condición estructural real del pavimento mediante mediciones objetivas (Contraloría General de la República, [CGR], 2024). Frente a ello, la presente tesis “Evaluación estructural de pavimentos mediante deflectómetro de impacto en la Vía Expresa Cusco, 2025” plantea aplicar ensayos FWD para obtener cuencos de deflexión, estimar parámetros estructurales por retrocálculo y contrastarlos con criterios técnicos, con el fin de sustentar decisiones de aceptación, refuerzo o mantenimiento en los tramos evaluados.

II. Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación del problema

En la entrega de pavimentos nuevos se exige verificación objetiva de la capacidad estructural con Falling Weight Deflectometer (FWD), siguiendo con la American Society for Testing and Materials (ASTM D4694) para medir el cuenco de deflexión y compararlo con criterios de diseño de Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)/ American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO), antes de abrir al servicio (ASTM, 2020; FHWA, 2017). La FHWA demostró que integrar FWD + retrocálculo en el proceso de aceptación/rehabilitación estabiliza la decisión de refuerzo incluso cuando los módulos de laboratorio y de campo difieren moderadamente, siempre que el cuenco cumpla rangos operativos (FHWA, 2017). Cuando el FWD no está disponible en obra nueva, Transport ha implementado correlaciones metrologías Light Weight Deflectometer (LWD)-FWD (97 equipos cotejados con un FWD calibrado) para asegurar trazabilidad en control de calidad de capas granulares y bases (Transport, 2023). En síntesis, el estándar internacional plantea que sin medición deflectométrica y umbrales verificables, la recepción conlleva alto riesgo de entregas deficientes (ASTM International, 2020; FHWA, 2017; Transport, 2023).

El manual de carreteras en la sección suelos y pavimentos del MTC dispone que la conformidad estructural se verifique por deflectometría (tradicionalmente viga Benkelman), con deflexión admisible/crítica en función del tránsito Equivalent Single Axle Load (ESAL), además permite el retrocálculo (AASHTO 1993) para estimar módulos por capa y SN efectivo, facilitando decisiones aceptar/observar/corregir en recepción (MTC, 2014). Este marco se aplica tanto a vías nuevas como a rehabilitaciones: medir corregir (temperatura/carga) retrocalcular comparar con umbrales del proyecto y de la norma. El problema surge cuando la obra se recibe sin verificación deflectométrica documentada o

con campañas insuficientes, pues se desconoce la holgura estructural real por tramo/carril y se arriesga a fallas tempranas y sobrecostos por intervenciones mal dimensionadas (MTC, 2014).

La vía expresa Cusco, la Contraloría General reportó deficiencias técnicas y riesgos de seguridad en 2023–2024 durante el proceso de entrega, alertando sobre la necesidad de correcciones para evitar incidentes y garantizar la continuidad de la obra (CGR, 2024). Este contexto evidencia una realidad problemática local: la vía es estratégica, tiene exigencia de calidad de entrega, pero carece de una validación pública y sistemática mediante FWD/BB con correcciones y comparación contra umbrales normativos/proyecto que confirma la capacidad portante por tramo antes de su puesta en servicio. De acuerdo con los lineamientos ASTM–FHWA y el MTC 2014, se requiere medición deflectométrica, retrocálculo (AASHTO 93) y contraste con umbrales como condición técnica para aceptar o ajustar la estructura de la vía expresa y así prevenir deterioro prematuro y costos evitables.

2.1.1 Problema general

¿Cómo evaluar la condición estructural por deflectometría mediante FWD en los pavimentos de la vía expresa Cusco, 2025?

2.1.2 Problemas Específicos

a. ¿Cómo determinar las características estructurales de pavimentos por retrocálculo de deflexiones FWD método AASHTO93 en la vía expresa Cusco, 2025?

b. ¿Cómo determinar los parámetros estructurales de pavimentos según las deflexiones FWD - viga Benkelman y el umbral del proyecto en los pavimentos de la vía expresa Cusco, 2025?

c. ¿Cómo determinar los parámetros estructurales de pavimentos por normativa peruana (CONREVIAl) y comparativa con viga Benkelman en los pavimentos de la vía expresa Cusco, 2025?

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo General

Evaluar la condición estructural por deflectometría mediante FWD, en los pavimentos de la vía expresa Cusco, 2025

2.2.2 Objetivos Específicos

a. Determinar las características estructurales de pavimentos por retrocálculo de deflexiones FWD método AASHTO93 en la vía expresa Cusco, 2025.

b. Determinar los parámetros estructurales de pavimentos según las deflexiones FWD - viga Benkelman y el umbral del proyecto en los pavimentos de la vía expresa Cusco, 2025.

c. Determinar los parámetros estructurales de pavimentos por normativa peruana (CONREVIAl) y con viga Benkelman en los pavimentos de la vía expresa Cusco, 2025.

2.3 Justificación e importancia

2.3.1 Justificación

La tesis se justifica porque la Vía Expresa Cusco requiere un diagnóstico estructural objetivo para decidir, con sustento técnico, si su pavimento puede entrar en funcionamiento y cumplir el control de calidad, la deflectometría FWD ensayo no destructivo validado por AASHTO-93 y FHWA para medir deflexiones, analizar el cuenco, retrocalcular módulos por capa y obtener indicadores como SN y vida remanente, con ello se identifican debilitamientos no visibles, se priorizan tramos y se eligen intervenciones puntuales, el procedimiento es replicable (medición FWD - análisis del cuenco - retrocálculo - verificación con umbrales), útil para otras vías urbanas y rurales.

Socialmente, reduce riesgos, tiempos y costos de viaje, y mejora la movilidad. Académicamente, aporta un modelo metodológico local que integra tecnología no destructiva y análisis mecánico-empírico, fortaleciendo la gestión vial en Cusco.

2.3.2 Importancia

La tesis aporta un diagnóstico estructural robusto y trazable de la vía expresa Cusco 2025, todas las deflexiones verificadas quedan por debajo de los umbrales (23×10^{-2} mm en WINDEPAV, $36-40 \times 10^{-2}$ mm en CONREVIAL), pese a la alta demanda de tránsito proyectada, esto demuestra capacidad suficiente y uniformidad del pavimento, ofrece parámetros confiables para planificación de conservación, sirve como caso de referencia para aplicar deflectometría de impacto y análisis comparativos en corredores urbanos de similares características.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis General

La evaluación por deflectometría mediante FWD en los pavimentos influye de manera positiva en la evaluación estructural de la vía expresa Cusco, 2025.

2.4.2 Hipótesis Específicas

- a.** La determinación estructural de pavimentos por retrocálculo de deflexiones FWD - método AASHTO93, son los idóneos en la vía expresa Cusco, 2025.
- b.** La determinación estructural de pavimentos según las deflexiones FWD - viga Benkelman y el umbral del proyecto son favorables en los pavimentos de la vía expresa Cusco, 2025.
- c.** La determinación de parámetros estructurales de pavimentos por normativa peruana (CONREVIAL) y comparativa con viga Benkelman son favorables en los pavimentos de la vía expresa Cusco, 2025.

2.5 Variables

Variable Dependiente

VD: Evaluación estructural de pavimentos

Variable Independiente

VI: Deflectómetro de impacto

Tabla 1*Operacionalización de variables*

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de medición	Instrumento
Variable D: Evaluación estructural de pavimentos	Caracterización de la capacidad portante a partir de deflexiones medidas y su comparación con criterios de aceptación/modelos; mediante retrocálculo se estiman módulos, vida remanente y refuerzo requerido. (FHWA, 2016; FHWA, 2017; Huang et al., 2022).	Cálculo y contraste de deflexiones en la Vía Expresa Cusco 2025 con umbrales admisibles; verificación de uniformidad, confiabilidad y desempeño frente al tránsito proyectado.	<ul style="list-style-type: none"> • Comportamiento por deflexión • Cumplimiento normativo 	<ul style="list-style-type: none"> • Deflexión característica • Deflexión admisible • Nivel de confianza 	<ul style="list-style-type: none"> • Razón ($\times 10^{-2}$ mm) • Razón (%) • Razón (%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Método WINDEPAV • Método CONREVIAl • Hojas de cálculo / registros de campo
Variable I: Deflectómetro de impacto (FWD)	Ensayo no destructivo que aplica una carga impulsiva y registra la cuenca de deflexión para inferir la rigidez de las capas: el pico central refleja el sistema completo y los sensores alejados informan sobre capas inferiores. Configuración típica: placa ≈ 30 cm, cargas ~ 20 – 70 kN y sensores radiales a distintas distancias. (ASTM D4694; FHWA, 2016; Horak, 2008; Rodríguez y Pérez, 2018).	Levantamiento de deflexiones conforme al procedimiento del estudio (configuración de sensores, cargas y correcciones) para alimentar el análisis/validación.	<ul style="list-style-type: none"> • Carga aplicada • Respuesta deflectométrica 	<ul style="list-style-type: none"> • Magnitud de carga aplicada por golpe • Deflexiones 	<ul style="list-style-type: none"> • Razón (kN) • Razón (μm o $\times 10^{-2}$ mm) 	<ul style="list-style-type: none"> • FWD (plato de carga, sistema de caída, geófonos) • Registros del equipo

Nota. En la tabla se muestra la identificación de las variables con sus conceptos, definiciones operacionales, dimensiones, indicadores, escalas y el instrumento a usar para determinarlas.

III. Marco Teórico

3.1 Antecedentes

Díaz et al. (2023) en su artículo “Multi-directional Falling Weight Deflectometer (FWD) testing and quantification of the effective modulus of subgrade reaction for concrete roads” estimó una distribución realista del módulo de reacción (k) de subrasante mediante cargas FWD multidireccionales. La metodología es de tipo aplicada, enfoque cuantitativo, nivel no experimental, el procedimiento es dinámico que infiere la distribución de presiones bajo losas y al dividirla entre deflexiones medidas, obtiene la distribución de k_{ef} . Los resultados mostraron que el procedimiento captura anisotropías/heterogeneidad del apoyo, mejorando el enlace FWD parámetros de soporte respecto al enfoque tradicional de k único. Concluye que el método refina el insumo de retrocálculo y diseño de sobre losas, aportando mayor fidelidad física al análisis.

Wang et al. (2024) en su artículo “Study on Dynamic Modulus Prediction Model of In-Service Asphalt Pavement” validó un modelo que transforme los módulos retro calculados con FWD al módulo dinámico estándar para diseño. La metodología es de tipo aplicada, enfoque cuantitativo, diseño no experimental, la población y muestra fueron de campo y laboratorio: 58 puntos FWD a ≥ 3 temperaturas separadas ≥ 5 °C, retrocálculo 15 testigos para ensayos de módulo dinámico a 10–60 °C y frecuencias hasta 33 Hz, ajuste por deducción y Gene Expression Programming (GEP). Resultando diferencia media 14.5 % entre módulo dinámico de laboratorio y el retro calculado, la conversión GEP generó 1 280 valores estandarizados (20 °C, 10 Hz), mostró una discrepancia de 22 % frente a usar solo los 15 testigos, mejorando la representatividad para vida remanente y sobre recubrimientos. Conclusión el uso sistemático de FWD + GEP permite identificar tramos con menor rigidez y reduce la dependencia de testigos, haciendo más preciso el dimensionamiento de refuerzos.

Sarkar et al. (2024) en su artículo “Deflection and Elastic Modulus Assessment of Subgrade in Flexible Pavement Mixed with Waste Tire Scrap Material” tuvo como objetivo fue comparar el desempeño estructural de subrasantes arcillosas vs. modificadas con *scrap* de neumático bajo carga FWD. La metodología fue tipo aplicada, nivel descriptivo, diseño no experimental, enfoque cuantitativo, con medición de deflexiones con FWD, procesamiento con KGP-BACK para estimar el módulo de subrasante y el Lower Layer Index; diseño comparativo de secciones en servicio. Los resultados fue que el caucho redujo las deflexiones 37.5 % e incrementó 2.68 veces el módulo de subrasante frente a la arcilla estándar. Concluye la combinación FWD retrocálculo evidenció ganancia estructural significativa, útil para decisiones de refuerzo y prácticas sostenibles.

Bastola et al. (2022) en su artículo “Structural Health Assessment of Pavement Sections in the Southern Central United States Using FWD Parameters” tuvo como objetivo fue verificar parámetros de “área de cuenco” para evaluar condición estructural a nivel red. Metodología fue de tipo aplicada, enfoque cuantitativo, diseño no experimental, análisis de 97 secciones en Arkansas, Louisiana, Nuevo México, Oklahoma y Texas; uso de bases LTPP, deflexiones FWD de todos los sensores y simulaciones para reducir campañas extensas. Resultados el enfoque de parámetros de área permitió clasificar tramos y priorizar mantenimiento sin retrocálculo exhaustivo, demostrando aplicabilidad operativa a gran escala. Conclusión los parámetros derivados del cuenco FWD son viables para diagnóstico estructural de red y soporte de decisiones de conservación.

Vankar et al. (2022) en su artículo “Structural Evaluation of Flexible Pavement Using Falling Weight Deflectometer” determinó la capacidad estructural y espesor de refuerzo con FWD. Metodología de tipo aplicada, enfoque cuantitativo, diseño no experimental, levantamiento FWD en 16.35 km de la NH-8; retrocálculo de módulos por capas y verificación con criterios de fatiga/ahuellamiento. Resultados módulos típicos:

capa bituminosa 600–2000 MPa, capa intermedia 100–450 MPa, inferior 80–300 MPa; un recubrimiento funcional de 50 mm fue suficiente en casi todos los tramos salvo 0.100–0.600 km donde se requirió 75mm. Conclusión el FWD identificó secciones críticas y permitió soluciones de refuerzo económicamente ajustadas.

Triviño y Moll (2022) en su artículo titulado “Evaluación deflectométrica en pavimentos flexibles mediante la viga Benkelman para las condiciones de Manabí” se evaluó estructuralmente un pavimento flexible del corredor Portoviejo–Santa Ana, tomando como muestra el tramo Colón–Lodana; para ello, definieron secciones homogéneas y verificaron si la deflexión característica superaba o no la deflexión admisible según CONREVIAL e INV E-795-13 ($D < D_{adm}$). En la metodología, desarrollaron un estudio cuantitativo, no experimental y transeccional, con mediciones cada 200 m (Tramo 1) y cada 20 m (Tramo 2); usaron viga Benkelman en el carril derecho con cargas de 8.49 t y 8.44 t; por prueba registraron el pico (D_0) y la lectura a 25 cm para estimar el radio de curvatura (R_c); ejecutaron 42 ensayos en el Tramo 1 y 51 en el Tramo 2, corrigiendo por temperatura y espesor conforme a AASHTO 1993 e INV E-795-13. En los resultados el Tramo 1 reportó deflexiones características de 0.72, 0.53 y 0.39 mm con módulos promedio de 319.04, 436.84 y 544.41 MPa, respectivamente, y R_c de 20.85, 35.90 y 40.34 cm; el Tramo 2 obtuvo deflexiones de 0.78, 0.72, 0.70 y 0.77 mm con módulos de 273.57, 315.31, 332.39 y 275.37 MPa, y R_c de 23.44, 5.87, 5.92 y 4.71 cm, la tipología estructural dominante fue Tipo III (pavimento “malo” con subrasante buena) y, pese a los deterioros observados, se verificó $D < D_{adm}$ en las secciones analizadas. En conclusión los autores demostraron que la V. Benkelman, aplicada con frecuencias de 200 m y 20 m y criterios CONREVIAL/INV, permite clasificar tramos y priorizar intervenciones al relacionar D_0 , R_c y módulo del paquete, aportando evidencia para decisiones de mantenimiento preventivo y rehabilitación en redes provinciales.

Ocmin y Ramos (2019) en su tesis de pregrado “Deflectometría de impacto para la determinación del refuerzo en la carretera Lima–Chosica km 35+535 al km 39+500” se analizó los factores que afectan la deflexión del pavimento flexible para determinar su influencia en el espesor de refuerzo de la vía evaluada, empleando el procedimiento mecánico-empírico de AASHTO. En cuanto a la metodología, desarrollaron un estudio aplicado, cuantitativo, no experimental y transeccional, sectorizando tramos homogéneos y ejecutando auscultación con FWD KUAB sobre el corredor PE-22 (progresivas 35+535–39+500) con registros de cuenco y correcciones por estructura de pavimento, carga y temperatura, retrocalculando Módulo resiliente de subrasante (M_{rr}), módulo efectivo del paquete (E_p) y Número Estructural efectivo (S_{Neff}) para, finalmente, dimensionar el refuerzo por tramo, los procedimientos incluyeron elaboración de deflectogramas, aplicación de factores de ajuste, comparación de espesores calculados con y sin correcciones y síntesis por sectores con tablas de M_{rr} , E_p , S_{Neff} y espesor de refuerzo. Los resultados fueron que al introducir los factores de corrección, el espesor de refuerzo se redujo en 52.28 % por efecto pavimento, 11.98 % por carga y 3.08 % por clima, verificando que el tratamiento de datos deflectométricos modifica de manera sustantiva el diseño del refuerzo, por ende los costos y la oportunidad de intervención; asimismo, se reportaron matrices de sectores homogéneos y comparativos de S_{Neff} futuro y efectivo que sustentaron el refuerzo promedio por sector. En conclusión, las autoras establecieron que la deflectometría de impacto con correcciones normativas y retrocálculo AASHTO constituye una base más precisa para decidir el refuerzo que los enfoques sin corrección, permitiendo optimizar espesores y priorizar tramos de intervención en la Lima–Chosica.

Rivera et al. (2014) en su artículo titulado “Diseño de pavimentos urbanos por retrocálculo según Guía AASHTO 93 mediante la utilización del deflectómetro liviano de impacto” desarrolló modelos de correlación LWD–FWD que permitieran aplicar el

retrocálculo AASHTO-93 para estimar módulo efectivo del paquete y módulo resiliente de subrasante en obras urbanas con variabilidad estructural, habilitando el dimensionamiento diferenciado de capas de rodadura. En la metodología ejecutaron un estudio aplicado, cuantitativo, no experimental y transeccional, con 12 tramos de prueba sobre bases terminadas y subrasantes contrastadas, midiendo con LWD (masas de 10 kg y 15 kg; cargas ~ 7 kN) y simulando la respuesta FWD (carga 40 kN, plato $a = 15$ cm) mediante teoría de capas elásticas y el programa BackVid; la muestra incluyó lecturas sobre base y, tras excavar $0,50 \times 0,50$ m, sobre subrasante, incorporando humedades/densidades y curvas constitutivas de laboratorio; los procedimientos consistieron en obtener d_0 (en base) y M_r (en subrasante) con LWD, simular los análogos d_0 , FWD y $M_{r,FWD}$, y ajustar modelos de conversión α , β en función de d_0 y M_r . Los resultados derivaron ecuaciones logarítmicas para $\beta(d_0)$ y lineales para $\alpha(M_r)$ con $R^2 = 0.77-0.95$, observaron que el rango óptimo del LWD es 15–70 MPa (10 kg) y 70–120 MPa (15 kg), y verificaron que, en el rango bajo de módulos, la relación LWD/FWD se aproxima a 0.90–1.15, coherente con antecedentes; finalmente. En conclusión establecieron una metodología LEMaC para estimar SN_{ef} y seleccionar el espesor de rodadura por retrocálculo AASHTO-93 a partir de mediciones LWD corregidas, ofreciendo una alternativa económica al FWD para control estructural en pavimentos urbanos con heterogeneidad de base y subrasante.

Julca (2022) en su tesis de maestría titulado “Deflectometría de impacto en la evaluación estructural, Carretera Central km 12+250 – km 26+500, Lima 2020” comprobó la incidencia de la deflectometría de impacto en la evaluación estructural del corredor y verificar si el área del cuenco de deflexiones permite inferir confiablemente la capacidad del paquete; formalmente, contrastó la hipótesis de que dicha área incide significativamente en la capacidad estructural del pavimento. En la metodología, realizó un estudio cuantitativo, no experimental y transeccional, sectorizando la vía como pavimento

mixto, delimitó secciones homogéneas con el método de diferencias acumuladas y aplicó deflectometría de impacto (FWD) para obtener el cuenco de deflexiones; luego comparó valores propios con intervalos de referencia del FHWA-HRT-16-011 y discutió la incidencia del área del cuenco frente a la deflexión máxima. En los resultados, al cotejar con rangos de referencia, la calzada derecha presentó $AREA = 27.14$ in y $Do=133\mu m$, mientras la calzada izquierda mostró $AREA = 24.41$ in y $Do=202.29 \mu m$, ubicándose el área dentro del intervalo de un HMA grueso (≥ 200 mm) y evidenciando coherencia con el carácter mixto del paquete evaluado. El análisis concluyó que los valores obtenidos “son muy cercanos y tienen la misma tendencia” que los intervalos convencionales y que el área del cuenco es un indicador más estable que el pico de deflexión para inferir condición estructural. En conclusión, el estudio aceptó la hipótesis general y alterna, estableciendo que la deflectometría de impacto incide significativamente en la evaluación estructural de la Carretera Central y que el área del cuenco especifica la capacidad del paquete, por lo que es válida para apoyar decisiones de gestión y priorización de refuerzos.

Farfán (2022) en su tesis “deflectómetro de impacto liviano y viga Benkelman para el análisis de deflexiones en pavimentos básicos con slurry seal, carretera Pisca–Pacaycasa 2022” tuvo como objetivo establecer numéricamente la relación entre las deflexiones medidas con LWD y con viga Benkelman en un pavimento básico tratado con slurry seal, verificando su utilidad para control de calidad y evaluación estructural. En la metodología, desarrolló un estudio aplicado, cuantitativo, no experimental y transeccional, sobre un tramo 6+700–8+400 de la carretera Pisca–Pacaycasa (Ayacucho), con auscultación en campo usando LWD HMP LFG y viga Benkelman; se efectuaron mediciones sistemáticas por carril, se corrigieron deflexiones por temperatura/estacionalidad y se elaboraron deflectogramas, complementando con retrocálculo para N° estructural conforme a criterios ASTM/MTC. Entre los resultados

destacó la ecuación de correlación $DLWD = 0.01089 + 0.9870 \cdot DVB$, con r de Pearson = 0.702 al 95 % de confianza, lo que evidenció alta consistencia lineal entre ambos métodos; adicionalmente se reportaron módulos y números estructurales consistentes por tramo, así como verificación de D característica vs. D admisible para decidir la conformidad estructural. En conclusión el autor sostuvo que el LWD puede emplearse como alternativa versátil y económica frente a la Benkelman para obras de baja/mediana envergadura, pues su correlación obtenida permite traducir lecturas LWD a parámetros equivalentes de Benkelman y soportar decisiones de mantenimiento/rehabilitación y aceptación de capas compactadas, optimizando tiempos y costos sin sacrificar confiabilidad.

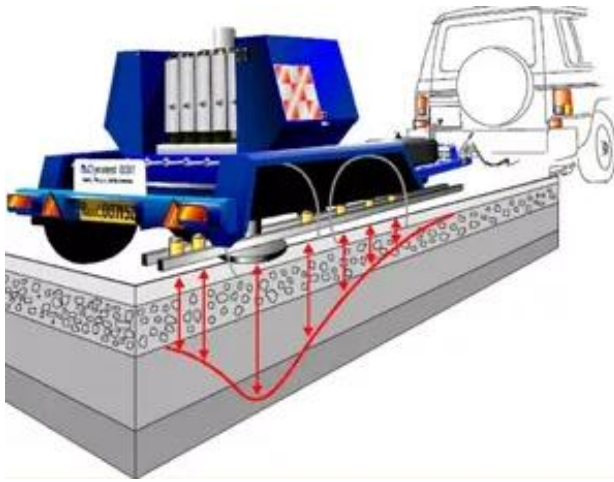
3.2 Bases teóricas

3.2.1 Evaluación estructural de pavimentos

Proceso de caracterizar la condición y capacidad estructural del pavimento a partir de deflexiones medidas y su contraste con límites/criterios de aceptación y modelos de análisis (FHWA, 2016; FHWA, 2017). La evaluación estructural de pavimentos es el proceso para determinar la capacidad portante y el estado de las capas mediante la respuesta deflectométrica medida, aplicando retrocálculo y criterios mecánico-empíricos para estimar módulos, vida remanente y necesidad de refuerzo (Huang et al., 2022).

Figura 1

Evaluación estructural de pavimentos



Nota. Esquema del equipo de auscultación a velocidad y la cuenca de deflexión en las capas del pavimento. Reproducido de Evaluación estructural no destructiva en pavimentos, s. f.

a) Diseño de pavimentos.

El diseño estructural de pavimentos depende de factores como:

- Tráfico proyectado (ESALs).
- Capacidad portante del suelo (CBR, R-Value).
- Condiciones climáticas.
- Materiales disponibles.

El método AASHTO es uno de los más utilizados, aunque existen otros como el método del Instituto del Asfalto (Asphalt Institute) o el método mecanístico-empírico (MEPDG) (Jiménez y Londoño, 2015).

El diseño estructural de pavimentos consiste en determinar el espesor y tipo de capas que soporten el tránsito proyectado durante un periodo específico. Uno de los métodos más utilizados es el propuesto por la AASHTO (1993), que considera el volumen de tránsito (ESALs), el clima, la capacidad portante del suelo y el tipo de materiales.

Para los pavimentos rígidos, se pueden usar métodos como el PCA (Portland Cement Association), mientras que el método mecanístico-empírico (MEPDG) es una opción más reciente y precisa (Delgado y Vargas, 2021).

b) Propiedades deseables en un pavimento

- Resistencia estructural.
- Durabilidad.
- Drenaje adecuado.
- Seguridad (resistencia al deslizamiento).
- Facilidad de mantenimiento.
- Comodidad de conducción (López y Sánchez, 2016).

c) Evaluación estructural de pavimentos.

Fundamental para tomar decisiones sobre mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción.

Según AASHTO (1993), el objetivo de la evaluación estructural es estimar la capacidad residual del pavimento, identificar daños estructurales y proponer soluciones técnicas que prolonguen su vida útil.

d) Métodos no destructivos

Los más usados incluyen:

- **Falling Weight Deflectometer (FWD):** mide las deflexiones del pavimento al aplicar una carga dinámica simulada (AASHTO, 1993).
- **Georradar (GPR):** detecta la profundidad de capas y presencia de humedad o vacíos (Rodríguez y Pérez, 2018).
- **Perfilómetros láser:** miden irregularidades superficiales que pueden asociarse con fallas estructurales.

Estos métodos permiten obtener perfiles de deflexión, que se usan para calcular el módulo elástico de las capas mediante retro análisis (Al -Qaly, 2007).

e) Métodos destructivos

Incluyen la toma de núcleos, calicatas o sondeos, para extraer muestras del pavimento y determinar propiedades físicas y mecánicas de los materiales (Neville, 2013).

f) Parámetros estructurales evaluados.

En la evaluación estructural se analizan variables como:

- Deflexiones máximas y cuencas de deflexión.
- Módulos de elasticidad de capas.
- Capacidad estructural existente y residual.
- Índice estructural necesario (SN).
- Número de ejes equivalentes (ESALs) soportados.

Estas variables permiten conocer la condición estructural del pavimento en términos cuantitativos (Horak, 2008).

g) Importancia de la evaluación estructural de pavimentos.

La adecuada evaluación estructural permite:

- Diagnosticar la condición del pavimento.
- Prever fallas futuras mediante modelos de deterioro.
- Optimizar los recursos económicos para conservación.
- Diseñar intervenciones técnicas apropiadas (López y Sánchez, 2016).

Además, permite determinar el Índice de Capacidad Estructural (SCI) y otros parámetros como la vida remanente, con base en datos recolectados en campo y su análisis posterior (Delgado y Vargas, 2021).

h) Factores que afectan el comportamiento estructural.

Entre los factores más influyentes se encuentran:

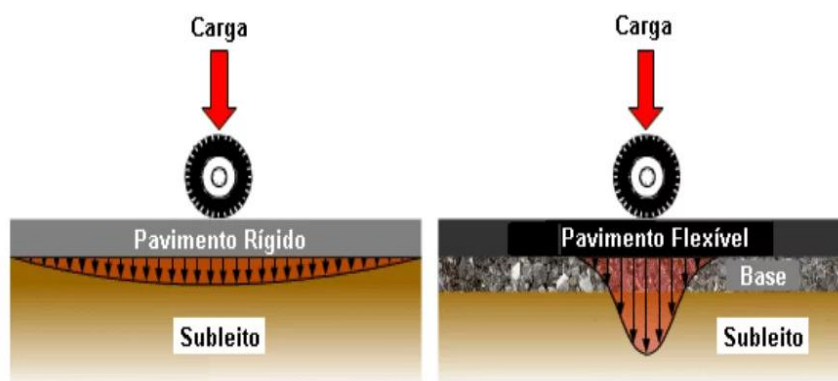
- Tráfico pesado acumulado.
- Calidad de materiales y diseño inicial.
- Drenaje deficiente.
- Clima (humedad y temperatura).
- Tiempo desde la construcción o última intervención (Ortiz, 2017).

Un análisis integral debe considerar todos estos aspectos para ser efectivo y fiable.

3.2.1.1 Comportamiento por deflexión. Es la forma en que el pavimento se deforma verticalmente cuando recibe una carga, y esa deformación funciona como un indicador directo de su capacidad estructural: en general, más deflexión = menor rigidez/capacidad, y el “cuenco” de deflexiones ayuda a entender qué parte de la estructura está más débil (Strategic Highway Research Program [SHRP], 1993). Es la forma de la cuenca de deflexión alrededor del punto de carga y permite inferir qué capa (mezcla asfáltica/base, subbase o subrasante) domina la deformación. Se obtiene con FWD (serie de geófonos a 0–900 mm, típicamente) o con equipos a velocidad (TSD). A partir de esa curva se calculan índices que separan la contribución de capas superiores, medias e inferiores para diagnosticar debilidades y definir acciones de rehabilitación. (Pierce et al., 2017; FHWA, s. f.).

Figura 2

Comportamiento de deflexión de una carretera rígida y una flexible



Nota. Comparación esquemática de la distribución de esfuerzos bajo una carga: en el pavimento rígido la cuenca de deflexión es ancha y somera la losa reparte la carga, mientras que en el pavimento flexible la deflexión es más concentrada y profunda cada capa toma parte de la carga. Reproducido de “Análisis comparativo de los métodos de suelo pavimento rígido y flexible”, por Araujo et al., 2016.

3.2.1.1 Deflexión característica. Es el valor representativo por sector homogéneo que resume la deflexión del tramo bajo carga, y se usa para tomar decisión técnica: la CE.010 indica que la deflexión característica por sectores homogéneos es la que se compara contra la deflexión admisible asociada al tránsito de diseño (MVCS, 2010). La deflexión característica (D_c) es un estadístico que representa a un tramo homogéneo y se calcula como la media de las deflexiones más un factor por la desviación estándar ($D_c = \bar{D} + f \cdot SD$), donde f depende del nivel de confiabilidad adoptado. Este valor se compara con la deflexión admisible del método vigente para decidir si el tramo está conforme o requiere refuerzo/rehabilitación; el cálculo debe hacerse con deflexiones previamente normalizadas (temperatura, humedad estacional) y por secciones homogéneas. (MTC, 2014; Main Roads Western Australia, 2020). Es un umbral de deflexiones del pavimento, representado por el

promedio de las deflexiones medidas con una desviación estándar aceptable en una distribución estadística normal, con la probabilidad de que las deflexiones de la muestra, se encuentren dentro de un intervalo de confianza aceptable.

Muestra de deflexiones, que son a partir de las deflexiones determinadas con la viga Benkelman.

En el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección: Suelos y Pavimentos (2014), se presenta las diferentes ecuaciones para determinar la deflexión característica de diferentes tipos de carreteras, tal como se muestra en la tabla 5.

Tabla 2

Deflexión Característica según tipo de carretera

Tipo de carretera	Deflexión característica Dc	Observación
Autopistas: Carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	$DC=Dm+1.645*ds$	Deflexión característica para una confiabilidad de 95%
Carreteras duales o multicarril: Carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	$DC=Dm+1.645*ds$	Deflexión característica para una confiabilidad de 95%
Carreteras de primera clase: Carreteras de IMDA entre 4000 y 2001 veh/día, de calzadas separadas de dos carriles	$DC=Dm+1.645*ds$	Deflexión característica para una confiabilidad de 95%
Carreteras de segunda clase: Carreteras de IMDA entre 2000 y 401 veh/día, de calzadas separadas de dos carriles	$DC=Dm+1.282*ds$	Deflexión característica para una confiabilidad de 90%
Carreteras de tercera clase: Carreteras de IMDA entre 400 y 201 veh/día, de calzadas separadas de dos carriles	$DC=Dm+1.282*ds$	Deflexión característica para una confiabilidad de 90%
Carreteras de bajo volumen de tránsito: Carreteras de IMDA entre ≤ 200 veh/día, de una calzada.	$DC=Dm+1.036*ds$	Deflexión característica para una confiabilidad de 85%

Nota. Donde Dm es deflexión media, Dc deflexión característica, ds desviación estándar para cada tipo de carretera y su confiabilidad, por Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección: Suelos y Pavimentos (2014) del MTC.

3.2.1.1.2 Deflexión admisible. Es el límite máximo permitido de deflexión para el tránsito de diseño; en términos prácticos, si la deflexión característica del sector supera la admisible, la estructura no está respondiendo como se espera para la demanda de ejes equivalentes del diseño, y se justifica corrección/rehabilitación según corresponda (MVCS,

2010). Del Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección: Suelos y Pavimentos (2014) del MTC, la deflexión admisible es la deflexión tolerable que garantiza un comportamiento satisfactorio del pavimento en relación con el tráfico que debe soportar. En el Manual se adopta la relación propuesta para el paquete estructural del pavimento, cálculo de la deflexión admisible propuesto por el CONREVIAl.

EC- 11 *Deflexión admisible*

$$D_{adm} = \left(\frac{1.15}{N} \right)^{0.25} \quad (1)$$

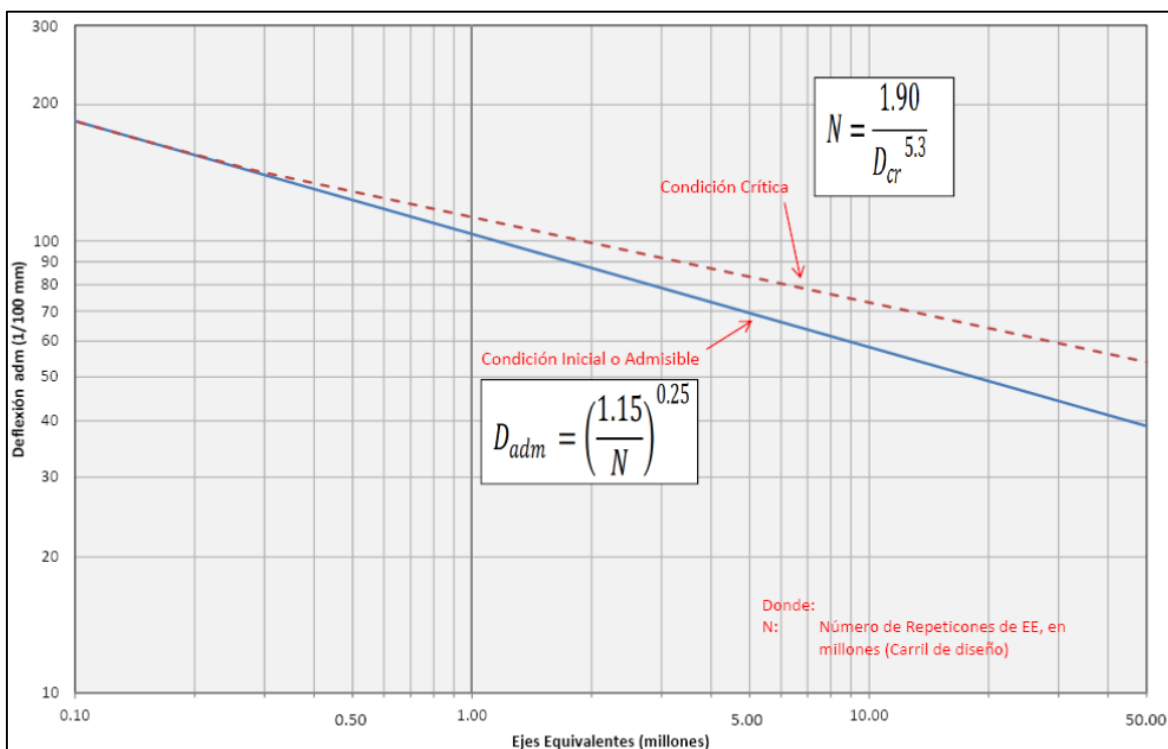
Donde:

D_{adm} = Deflexión admisible, en mm (a compararse con las deflexiones de la viga Benkelman)

N = Número de repeticiones de ejes equivalentes, en millones (carril de diseño).

Figura 3

Correlación de EE con Deflexión Admisible y Deflexión Crítica



Nota. En la figura se muestra los ejes equivalentes donde la línea azul es la condición inicial equivalente y la línea entrecortada roja es la condición crítica, por Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección: Suelos y Pavimentos (2014)

3.2.1.2 Cumplimiento normativo. Es la verificación de que el control de calidad y aceptación se hace con el procedimiento y criterios que exige la norma aplicable; por ejemplo, en vías expresas la norma CE.010 contempla medir deflexiones al finalizar la obra como control final y para recepción, definiendo que se trabaja por sectores homogéneos y con comparación contra un valor admisible (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2010). El cumplimiento normativo es entendido como la función corporativa que garantiza que una organización pueda demostrar el cumplimiento de todas las leyes, regulaciones, códigos de conducta y estándares de buenas prácticas aplicables, este concepto abarca tres dimensiones principales: el cumplimiento regulatorio o adhesión a leyes externas, el cumplimiento corporativo o seguimiento de políticas internas, y el cumplimiento ético o alineación con estándares de responsabilidad social internos (International Compliance Association [ICA], 2021).

3.2.1.2.1 Nivel de confianza. Es el porcentaje (por ejemplo 95%) que expresa cuán seguro es un intervalo o decisión estadística en repetición de muestreos; un nivel de confianza de $1-\alpha$ significa que, si repitieras el muestreo muchas veces, en aproximadamente ese porcentaje los intervalos incluirían el valor real del parámetro (NIST/SEMATECH, s. f.). En el contexto de carreteras y pavimentos asfálticos, el nivel de confianza es un parámetro estadístico que cuantifica la probabilidad de que un pavimento diseñado mediante métodos probabilísticos cumpla con sus requisitos de desempeño durante su vida útil prevista, considerando la variabilidad inherente de los materiales, cargas de tránsito y condiciones ambientales. Según AASHTO (1993) en su Guía para el

Diseño de Pavimentos, el nivel de confianza representa la probabilidad de que los diversos parámetros de diseño resistencia de materiales, espesores, tránsito futuro sean al menos iguales a los valores utilizados en el diseño. Se expresa como un porcentaje que refleja el grado de certidumbre deseado en el desempeño del pavimento.

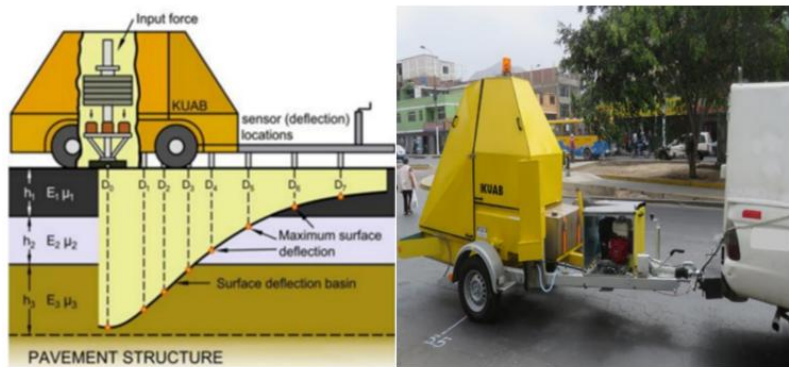
3.2.2 Deflectómetro de impacto

Equipo de ensayo no destructivo que aplica una carga impulsiva mediante caída de masas y mide la cuenca de deflexión en el punto de carga y radios definidos. (ASTM D4694; FHWA, 2016). El Falling Weight Deflectometer (FWD) simula el paso de un eje vehicular mediante la caída de una masa sobre una placa circular apoyada en la superficie del pavimento. Al generarse el impacto, una serie de sensores ubicados a distintas distancias desde el centro de la carga miden la cuenca de deflexión generada (Horak, 2008). Esta cuenca es representativa del estado estructural del pavimento. El principio físico en el que se basa el FWD es que las deflexiones medidas en la superficie reflejan la rigidez de las distintas capas del sistema estructural del pavimento. La deformación en el centro de carga refleja el estado del sistema completo, mientras que las deflexiones en posiciones más alejadas permiten evaluar las capas inferiores (Rodríguez y Pérez, 2018). Asimismo, el equipo de mediciones FWD, está conformado por, un vástago que soporta al sistema de masas (que simula la carga del par de llantas tándem de un eje de vehículo pesado), en la parte baja del vástago lleva una placa circular de 30 cm de diámetro, y en su base una capa de caucho, de manera que el plato al apoyarse sobre la superficie del pavimento se adapte a su forma y la carga de impacto se distribuya uniformemente, el sistema de masas está estandarizada para generar cargas de impacto de 20, 40, 50 y 70 kN, las deflexiones son medidas por sensores o transductores (en los diferentes tipos de FWDs se denominan geófonos o sismómetros), ubicados a criterio del Especialista y acordes a Normativas, en nuestro caso están distanciados desde el centro 0.00 a 0.20, 0.30, 0.45,

0.60, 0.90, 1.20 m, de forma radial desde el centro de la placa hacia afuera, la precisión de las mediciones son de 0 a 5 micrómetros.

Figura 4

Deflectómetro de impacto (FWD)



Nota. En la figura se observa el equipo donde se observa los diferenciales de deflexiones emitidas por los sensores.

a) Evaluación estructural de pavimentos mediante deflectometría de impacto.

La evaluación estructural de pavimentos es un proceso técnico mediante el cual se analiza la capacidad de carga residual de una estructura vial, con el fin de determinar su comportamiento actual y predecir su desempeño futuro ante la acción del tránsito. Este análisis es fundamental para establecer políticas de conservación vial y tomar decisiones informadas sobre rehabilitación o reconstrucción (González, Méndez y Cruz, 2020).

Uno de los métodos más ampliamente utilizados a nivel mundial para este fin es la deflectometría de impacto, que permite estimar la rigidez del sistema estructural del pavimento en condiciones reales de servicio (AASHTO, 1993).

Asimismo, la conservación y rehabilitación de pavimentos requiere de herramientas precisas y no destructivas que permitan determinar su condición estructural real. En este contexto, el método de deflectometría de impacto, a través del uso del equipo Falling Weight Deflectometer (FWD), se ha consolidado como una de las técnicas más

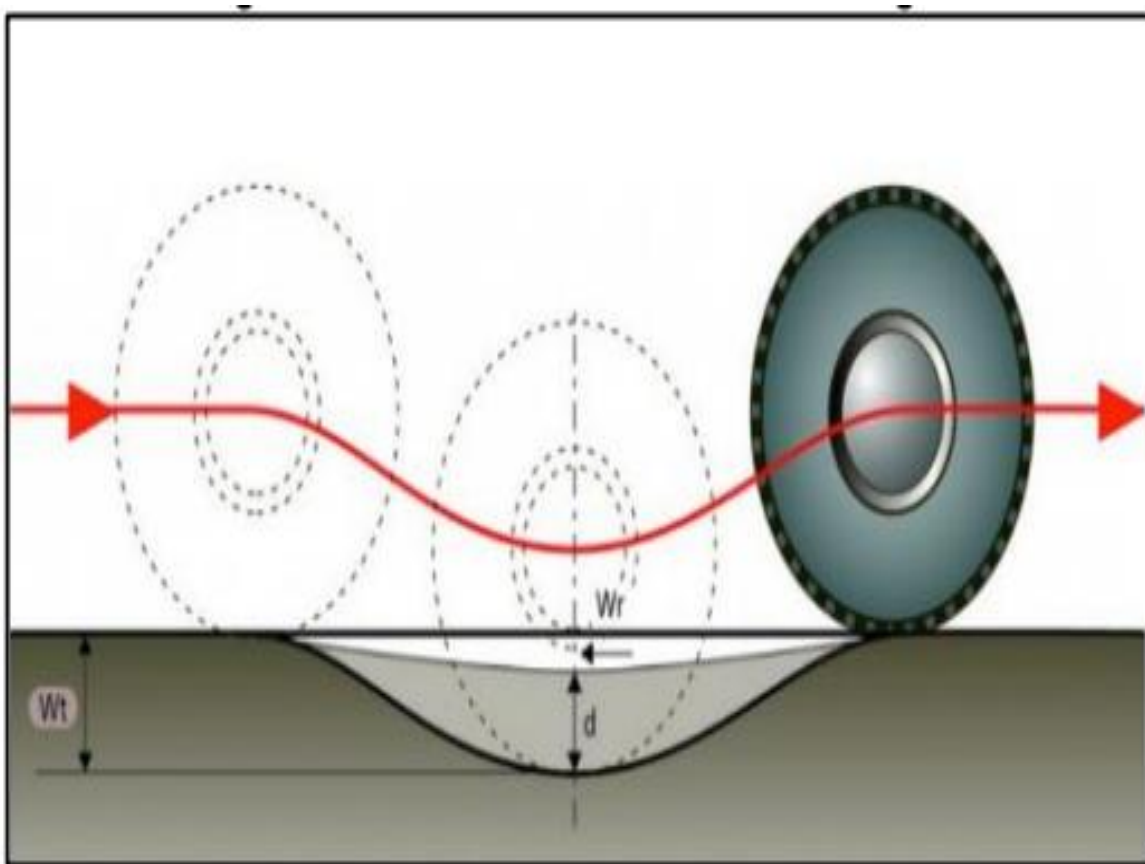
eficaces para evaluar la capacidad estructural de pavimentos en servicio (González, Méndez y Cruz, 2020)

La evaluación estructural busca estimar la capacidad de carga que conserva el pavimento, analizando su respuesta ante cargas vehiculares simuladas. De esta manera, se identifican zonas críticas, se determina la rigidez de las capas y se calcula la vida útil remanente. Según AASHTO (1993), este proceso es vital para diseñar intervenciones eficientes y económicamente sostenibles.

En términos generales, la evaluación estructural se basa en tres principios:

- Medición de la respuesta del pavimento (deflexiones).
- Análisis de esa respuesta mediante modelos estructurales.
- Determinación de parámetros como módulos elásticos, capacidad residual y necesidades de refuerzo (Jiménez y Londoño, 2015).

Consiste en la determinación de la capacidad de soportante estructural de las capas de los pavimentos, medidas en cualquier momento de la vida de servicio, de manera que permita establecer y cuantificar las necesidades de conservación, mejoramiento o rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al fin de su vida útil o cuando va cambiar de función. Una de las formas de realizar la evaluación estructuralmente de los pavimentos es mediante deflexiones, las cuales nos brindan información valiosa de la respuesta del sistema pavimento – subrasante, como consecuencia de la acción de cargas móviles y/o estáticas.

Figura 5*Deflexión por cargas móviles*

Nota. En la figura se observa el trayecto de la llanta en simulación de como genera la deformación

a) Principio de método de deflectometría de impacto (FWD).

El Falling Weight Deflectometer (FWD) es un equipo no destructivo que simula el paso de una carga vehicular aplicando un impacto controlado sobre la superficie del pavimento mediante una masa que cae desde una altura determinada. Al aplicarse la carga, una serie de sensores ubicados radialmente miden la cuenca de deflexión generada, la cual refleja el comportamiento estructural del pavimento en ese punto (Horak, 2008).

El principio del FWD se basa en que las capas del pavimento más cercanas punto de carga influyen en los sensores próximos, mientras que las capas inferiores afectan los

sensores más alejados. Esto permite, mediante un proceso de retro análisis, inferir los módulos elásticos de cada capa del pavimento (Horak, 2008).

También, el FWD simula la carga generada por un eje vehicular mediante la caída libre de una masa desde una altura controlada. Esta masa impacta un sistema amortiguador sobre una placa circular que aplica la carga al pavimento. Alrededor de esta placa se ubican sensores geofónicos que miden la deflexión del pavimento en diferentes puntos radiales, formando lo que se conoce como la cuenca de deflexión (Horak, 2008).

Este método permite estimar, de forma indirecta, la rigidez estructural de las diferentes capas del pavimento a través del análisis de su respuesta mecánica frente a una carga dinámica (Rodríguez y Pérez, 2018).

b) Aplicación de FWD en la evaluación estructural de pavimentos.

El uso del FWD es fundamental para determinar parámetros como:

- **Deflexión máxima (D0):** relacionada directamente con la rigidez global del sistema estructural.
- **Cuenca de deflexión:** usada para caracterizar el comportamiento de capas individuales.
- **Módulos de elasticidad (E):** obtenidos mediante retro análisis, son esenciales para evaluar la capacidad estructural.
- **Índice estructural de capacidad (SCI):** se calcula con base en las deflexiones medidas (Delgado y Vargas, 2021).

Además, el FWD permite estimar la vida útil remanente, planificar el refuerzo estructural necesario, y optimizar el diseño de rehabilitaciones (Rodríguez y Pérez, 2018).

c) Proceso del retro análisis.

El retro análisis consiste en utilizar las deflexiones medidas por el FWD para calcular los módulos de elasticidad de cada capa del pavimento. Este proceso se realiza mediante software especializado como:

- ELMOD (Dynatest)
- EVERCALC (WSDOT)
- MODULUS (FHWA)

El retro análisis requiere una suposición inicial sobre el número y espesor de capas, así como los parámetros de Poisson. Luego, mediante técnicas de minimización del error entre deflexiones medidas y calculadas, se ajustan los módulos de cada capa (Al-Qadi y Elseifi, 2007).

El retro análisis es una técnica computacional que busca ajustar los valores de módulos elásticos de las capas del pavimento hasta que las deflexiones calculadas coincidan con las medidas en campo. Para ello, se requiere conocer:

El espesor y número de capas del pavimento.

Supuestos razonables del coeficiente de Poisson.

Modelos elásticos multicapa.

d) Objetivos de la FWD en pavimentos.

Los principales objetivos del uso del FWD en evaluación de pavimentos son:

- Determinar la capacidad estructural residual del pavimento.
- Estimar los módulos de elasticidad de cada capa del sistema.
- Calcular el espesor de refuerzo necesario.
- Estimar la vida útil remanente del pavimento.
- Identificar fallas estructurales invisibles superficialmente (Delgado y Vargas, 2021).

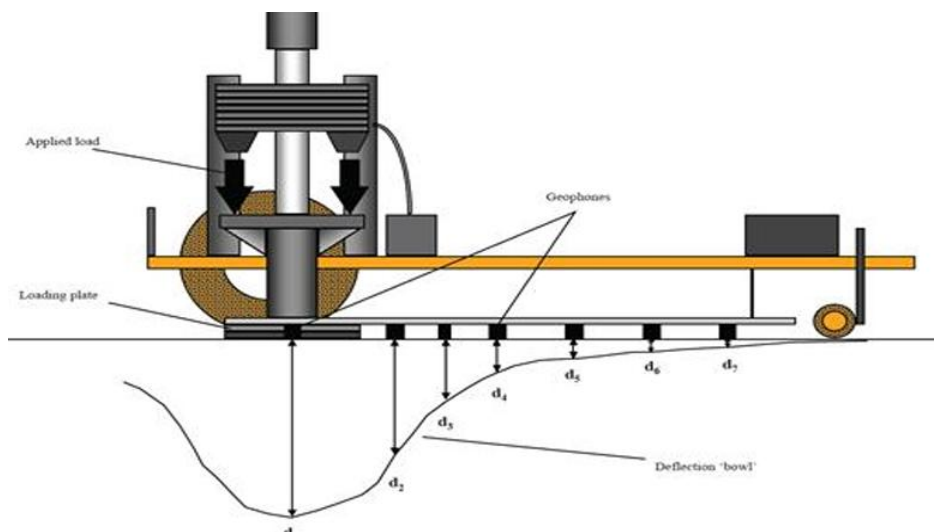
e) Proceso de mediciones en campo.

El proceso de mediciones de deflexiones, se han efectuado siguiendo las indicaciones dadas en la normativa ASTM-4694 (Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device).

- Los espaciamientos entre ensayos, son los indicados por el especialista y según objetivo del ensayo.
- Previo a las mediciones, se realizan los protocolos de trabajabilidad (calentamiento) de los elastómeros de buffers de impacto, sistemas comandados desde una computadora portátil.
- En cada punto de ensayo, se ubica el equipo FWD y su plato de carga.
- La medición se inicia activando el elevador de masas hasta una determinada altura programada, luego se dejan caer las masas, de forma automática sobre la superficie del pavimento, elevaciones e impactos de forma secuencial de cargas de impactos de 20, 40, 50, 70 kN, con dichos impactos se activan los sensores o sismómetros de deflexión.
- Se registran, la carga de impacto aplicada al pavimento, la deflexión máxima y las deflexiones en los demás sensores, la temperatura del aire, temperatura de la superficie del pavimento y de la ubicación geográfica del punto de ensayo. • Luego de la medición en cada punto de ensayo, tanto el bastidor de masas, la placa de carga, y la viga de los sensores, se vuelven a su posición de transporte, para lo cual el sistema mediante la computadora portátil comunica al operador que puede proseguir al próximo punto de medición. Todo el proceso efectuado, por cada punto de ensayo, aproximadamente dura 45 segundos.

Figura 6

Esquema del cuenco de deflexiones ante el impacto del deflectómetro



Nota. En la figura se observa la fuerza emitida por el equipo donde se tienen los d0 hasta d7 que son las deformaciones medida por los sensores.

f) Proceso de corrección de deflexiones por carga y temperaturas.

Las deflexiones, tanto para la determinación de las propiedades estructurales por retrocálculo, tanto del pavimento y de la subrasante (M_r y E_p), así como para la comparativa de las deflexiones por tramos homogéneos con los umbrales de las deflexiones admisibles.

Análisis de deflexiones

Las deflexiones medidas en campo por el FWD, pueden ser procesadas, con fines estructurales o de umbrales de deflexiones.

Con fines de determinación de las características estructurales de los pavimentos, es decir para la determinación los módulos, tanto para el módulo equivalente del pavimento (E_p), así como para el módulo de resiliencia de la subrasante (M_r), la de mayor aplicación descrita en la Guía AASHTO 93, para el diseño de estructuras de pavimentos. Otra con fines de comparar las deflexiones máximas de tramos homogéneos con deflexiones

admisibles. Para los cuales, previamente las deflexiones medidas se corrigen, tanto por carga y temperatura.

Corrección de cargas

Las deflexiones de los pavimentos medidas en campo se estandarizan, referidas a la carga de impacto sea a 40 o 50 kN, bajo la siguiente correlación.

EC- 1 Corrección de cargas

$$\Delta i_r = \Delta i * \left(\frac{P_r}{P} \right) \quad (2)$$

Donde:

Δi_r = Deflexión corregida, por cada sensor i, referida a la carga estándar.

Δi = Deflexión medida en el sensor i, ante la carga del deflectómetro FWD.

P_r = Carga estándar, de referencia.

P = Carga actuante por el deflectómetro FWD, de campo.

Cabe indicar que, las cargas aplicadas durante los ensayos de campo se acercan a las cargas configuradas de 40 o 50 kN, lo cuales se deben corregir o estandarizar, son cargas acordes a la metodología y Normativa ASTM D 4694-09.

Corrección por Temperatura

Corregir por temperatura del pavimento, es llevar las condiciones de evaluación, de la temperatura medida en campo a la temperatura de referencia de 20°C. Es decir, las deflexiones (D_f) registradas a la temperatura de campo (t).

EC- 2 Corrección por temperatura

$$D_f(T) = \text{Factor}(T) \times D_f(t) \quad (3)$$

Donde:

$D_f(T)$ = Deflexión corregida, para 20°C.

Factor (T)= Factor de corrección por temperatura, según la AASHTO.

Df (t)= Deflexión obtenida en campo.

Asimismo, se toma, la siguiente ecuación.

EC- 3 *Factor de corrección por temperatura*

$$F_T = \frac{1}{1 + 8 * 10^{-4} * h * (t - T_{ref})} \quad (4)$$

Donde:

h= Espesor de las capas en el sitio de la medida (cm)

t= Temperatura de las capas asfálticas en el momento de la medida (°C)

T = Temperatura media anual de la zona del proyecto (20°C)

Cuando las temperaturas del medio ambiente y de las capas asfálticas se incrementan, también se incrementan las deflexiones del pavimento, porque los materiales aglomerantes sean asfalto u otros se ablandan, consecuentemente decrece la rigidez del material del pavimento, debido al predominio de las propiedades viscosas del asfalto, lo que se traduce en una disminución de la respuesta elástica del pavimento y consecuentemente de las deflexiones son altas

g) Metodología del retrocálculo de módulos m_r y e_p , AASHTO 93.

La metodología de mayor aplicación, es de la Guía AASHTO 93, para diseño estructural de pavimentos, en este caso por retrocálculo de deflexiones. La metodología del retrocálculo de deflexiones, se basa en la teoría mecanicista de los materiales del pavimento, formada por diversas capas, las cuales a su vez forman un cuenco de deflexiones de forma elástica, ante el paso de una carga vehicular estandarizada. Con la información, del cuenco de deflexiones, las características generales del suelo de la subrasante, así como los espesores de las capas del pavimento existente, se pueden determinar los parámetros de la condición estructural, en evaluación.

- Módulo Resiliente de la subrasante (M_r)
- Módulo Equivalente del pavimento (E_p)

1) Módulo Resiliente de la Subrasante (M_r)

Con la deflexión máxima D_r , de la superficie del pavimento, medida en el centro de la placa de carga, se calcula el Módulo de Resiliencia M_r de la subrasante, con la siguiente ecuación de AASHTO:

EC- 4 *Módulo resiliente de la subrasante (M_r)*

$$M_r = \frac{0.24 * P}{r * d_r} \quad (5)$$

Donde:

M_r = Módulo de Resiliencia de la subrasante por retrocalculado (psi)

P = Carga aplicada (libras)

d_r = Deflexión superficial a una distancia “ r ” del centro de la carga (pulg)

r = Distancia al centro de la carga (pulg)

Como la subrasante están conformados por suelos naturales o mejorados, para estas no se hacen ajustes por temperatura.

La distancia (r) debe cumplir con la siguiente expresión, de mínimo el 70% del Radio del bulbo de tensiones formados en la interface de pavimento con subrasante:

EC- 5 *Radio del bulbo de tensiones en la interfase pavimento – Subrasante*

$$r \geq 0.7 * a_e$$

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D * \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2} \quad (6)$$

Donde:

a_e = Radio del bulbo de tensiones en la interface pavimento – subrasante (pulg)

a = Radio del plato de carga (pulg)

D = Espesor total del pavimento, sobre la subrasante (pulg)

E_p = Módulo efectivo del pavimento, sobre la subrasante (psi)

Tabla 3*Módulo de la Subrasante*

Capas del pavimento	Espesor (m)	E (Mpa)	v
Capas con mezclas bituminosas (Capa bituminosa inferior con $V_b=12\%$)	0.17	3400	0.35
Base granular CBR 100 % compactada al 100 % de la MDS	0.27	420	0.4
Subbase granular CBR 40 % compactada al 100 % de la MDS	0.25	200	0.4
Subrasante		120	0.45

Nota. En la tabla se observa las diferentes capas de pavimentos, donde le corresponde su espesor, coeficiente de elasticidad y su coeficiente de Poisson (ν), por el Informe 5, Estudio de Pavimentos del proyecto.

2) Factor de Corrección (C)

Los Módulos de Resiliencia M_r , calculados por el Método AASTHO, deben ser corregidos, con un factor de ajuste “C”, para obtener un M_r de diseño, y su determinación puede ser por Tablas de Guía AASTHO o mejor calibrados en base a M_r obtenidos por ensayos de laboratorio, de auscultaciones, muestreos y ensayos de materiales, tales como el CBR.

EC- 6 Factor de corrección

$$Mr_{Diseño} = C * Mr(\text{psi}) \quad (7)$$

Donde:

C= Factor de corrección.

$Mr_{Diseño}$ = Módulo de resiliencia de la subrasante de diseño (psi)

M_r = Módulo de resiliencia de la subrasante por retrocálculo (psi).

Los módulos resilientes retrocalculados para la subrasante, deben ser ajustados al módulo resiliente de laboratorio, con los factores de corrección “C” dados por la Guía AASHTO, según tipo de material.

Tabla 4*Factor de corrección*

Plataforma de Fundación	Factor C
Suelos Finos	0.33
Suelos Granulares	1
Terraplén Granular sobre suelos finos	$C = 0.33 + 0.67 \times h/2$ $0 < h < 2 \text{ m}$
Terraplén Fino sobre suelos granulares	$C = 1.00 - 0.67 \times h/2$ $0 < h < 2 \text{ m}$
Suelos de Subrasante Estabilizados por debajo de la Sub Base	0.75
Suelos de Subrasante por debajo de un pavimento sin Base Granular no consolidada y/o de la Capa de Sub Base, y sin Subrasante Estabilizada	0.52
Suelos de Subrasante por debajo de un pavimento con Base Granular consolidada y/o Sub Base, pero sin Subrasante Estabilizada	0.35

Nota. En la tabla se observa los diferentes suelos que contiene una plataforma de pavimento donde estos suelos tienen su respectivo factor C, por *Design Pamphlet for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993, AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures edition FHWA-RD-97-083.*

Para el presente proyecto, los Factores de corrección “C”, determinamos en base a los resultados de ensayos de laboratorio de los suelos de la subrasante, del CBR y Mr, con los que se corrigen los Módulos Resiliente de la Subrasante (Mr) del retrocálculo, para cada Calzada y Tramo. La ecuación que correlaciona el CBR y Mr, del Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección: Suelos y Pavimentos (2014) del MTC, es:

EC- 7 *Módulo resiliente de la subrasante*

$$M_R = 2555 \times CBR^{0.64} \quad (8)$$

Donde:

MR=Módulo Resiliente (psi)

CBR= California Bearing Ratio (%)

El CBR de la subrasante adoptado para el presente proyecto es de 45%, donde este CBR es el promedio de los CBR reportados en los informes de Frecuencias de Ensayos de material de préstamo que provienen de la cantera Nuchupata.

h) Módulo Equivalente del Pavimento (Ep).

El módulo equivalente del pavimento o módulo de elasticidad del pavimento, es la rigidez.

EC- 8 Módulo equivalente del pavimento

$$d_0 = 1.5 * p * a * \left\{ \frac{1}{M_r \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_r}} \right)^2}} + \left[\frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{E_p} \right] \right\} \quad (9)$$

Donde:

d_0 = Deflexión central.

p = Presión del plato de carga, psi.

a = Radio del plato de carga, pulgadas

D = Espesor total de las capas del pavimento sobre la subrasante, pulgadas

M_r = Módulo resiliente de la subrasante, psi

E_p = Módulo de elasticidad de las capas que conforman el pavimento, psi.

El módulo equivalente del pavimento (E_p), se calcula mediante iteraciones consecutivas de posibles valores hasta que cumpla la igualdad de la ecuación anterior.

i) Número Estructural Efectivo (S_{Neff}).

De acuerdo a la Guía de diseño AASHTO-93, la capacidad estructural de un pavimento, representado por el Numero Estructural Efectivo, S_{Neff} , determinado a partir de la información del cuenco de deflexiones, de su módulo equivalente y del espesor total del pavimento, mediante la siguiente ecuación:

EC- 9 *Número estructural efectivo (S_{Neff})*

$$SN_{eff} = 0.0045 * D * \sqrt[3]{E_p} \quad (10)$$

Donde:

S_{Neff}= Número estructural efectivo. (adimensional)

D=Espesor total del pavimento (pulgadas).

E_p= Módulo equivalente, que representa a todas las capas del pavimento (psi)

Tabla 5

Número estructural de diseño

Capas de pavimentos	Espesor (m)			
	Tramo A1	Tramo B1	Tramo C1	Tramo D1
	6.67*10⁷ N	4.71*10⁷ N	2.68*10⁷ N	1.95*10⁷ N
Capas con mezclas bituminosas	0.17	0.17	0.14	0.14
Base granular CBR 100 % compactada al 100 % de los MDS	0.27	0.27	0.27	0.27
Subbase granular CBR 40 % compactada al 100 % de la MDS	0.25	0.25	0.25	0.25
Subrasante	-	-	-	-
SN -Número estructural	5.69	5.69	5.15	5.15
W ₁₈ Número de aplicaciones de cargas equivalente de 80 kN	6.7*10 ⁷ N	6.7*10 ⁷ N	3.41*10 ⁷ N	3.41*10 ⁷ N

Nota. En la tabla se observa el SN – número estructural de 5.69 en el tramo A1 y B1 del estudio de pavimentos del proyecto.

j) Determinación del módulo equivalente de diseño del pavimento.

Para determinar el módulo equivalente de diseño del pavimento en evaluación, emplearemos la siguiente correlación en base al número estructural de diseño y espesor total del pavimento.

EC- 10 *Módulo equivalente de diseño del pavimento*

$$E_p = \left(\frac{SN_{eff}}{0.0045 \times D} \right)^3 \quad (11)$$

Considerando que el pavimento de este proyecto es nuevo, el número estructural efectivo S_{Neff} , es igual al número estructural del proyecto (SN).

k) Deflexión Crítica

Es el parámetro que experimentan los pavimentos al final de su periodo de servicio, el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección: Suelos y Pavimentos (2014), para determinar la deflexión crítica, el Manual presenta la siguiente ecuación.

EC- 12 *Deflexión crítica*

$$D_{cr} = \left(\frac{1.90}{N} \right)^{\frac{1}{5.3}} \quad (12)$$

Donde:

D_{cr} = Deflexión crítica en mm

N = Número de repeticiones de ejes equivalentes en millones

l) Correlación Deflexión FWD - Deflexión Benkelman.

En el Manual de Inventarios Viales del MTC RD N° 09-2014 MTC/14 (2016), se presenta la ecuación de correlación entre las deflexiones del deflectómetro de impacto y la viga Benkelman, bajo la siguiente correlación:

EC- 13 *Correlación Deflexión FWD - Deflexión Benkelman*

$$DefBB = 0.176 \times (DefFWD)^{1.382} \quad (13)$$

Donde:

DefFWD = Deflexión FWD de 40kN, ajustadas a 50 kN

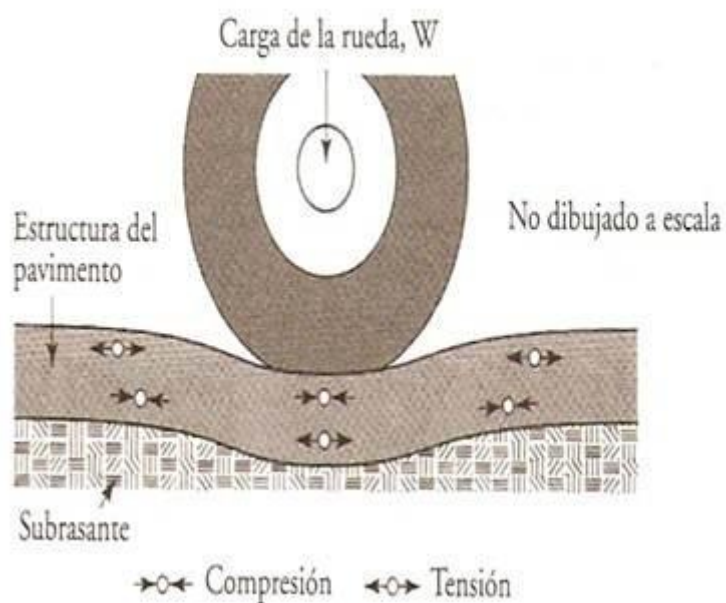
DefBB = Deflexión Benkelman, a 40 kN

3.2.2.1 Carga aplicada. En ingeniería estructural y mecánica, la carga aplicada se refiere a cualquier fuerza, momento, presión o sistema de fuerzas externas que actúa sobre una estructura o elemento estructural, induciendo esfuerzos internos, deformaciones y

desplazamientos. Representa la acción externa que demanda una respuesta resistente del sistema estructural para mantener el equilibrio. Según el American Institute of Steel Construction [AISC] (2017), las cargas aplicadas constituyen las solicitaciones primarias que el sistema estructural debe resistir de manera segura y eficiente durante su vida útil, siendo su correcta determinación fundamental para el diseño estructural adecuado. Es la fuerza que el equipo (FWD) transmite al pavimento mediante una placa de carga, generando un pulso controlado; esa carga se mide con celda de carga, y se ajusta para simular condiciones representativas de tránsito y evaluar la capacidad estructural del sistema (Federal Highway Administration [FHWA], 2017).

Figura 7

Cargas existentes en un pavimento flexible



Nota. La figura muestra un esquema conceptual de la distribución de esfuerzos en un pavimento flexible bajo una carga de rueda, adaptado de Procedimiento de diseño de pavimento flexible por Ingeniería Civil, 2018.

3.2.2.1.1 Magnitud de carga aplicada por golpe. La magnitud de carga aplicada por golpe en carreteras se refiere al valor máximo de fuerza dinámica generada por la

interacción súbita entre un vehículo y la superficie del pavimento o elementos asociados (baches, juntas, desniveles), que se transmite a la estructura del camino. Esta carga puntual de alta intensidad y corta duración excede significativamente las cargas estáticas del vehículo en reposo. En el contexto de la ingeniería de pavimentos, como señala la (AASHTO, 1993), esta magnitud representa un componente crítico de las cargas vivas dinámicas que deben considerarse en el diseño y evaluación estructural, ya que genera esfuerzos localizados que aceleran el deterioro por fatiga. Es el nivel de carga objetivo que se aplica en cada golpe del FWD; las guías recomiendan secuencias con golpe de asiento y golpes registrados a diferentes cargas objetivo para mejorar consistencia del dato y capturar comportamientos no lineales (FHWA, 2017).

a) Características Principales

Origen: Resulta principalmente de irregularidades superficiales (baches, juntas mal niveladas), frenado/ aceleración brusca, o impacto con objetos en la vía.

Naturaleza Dinámica: Es una carga transitoria de alta tasa de aplicación (milisegundos), que induce vibraciones en el sistema pavimento-vehículo.

Magnitud: Puede superar entre 1.5 a 4 veces la carga estática de la rueda, dependiendo de la velocidad y severidad del defecto.

Localización: El efecto es altamente localizado, generando máximos esfuerzos de tensión y cortante directamente bajo el punto de impacto.

Propagación: La energía del golpe se disipa y distribuye rápidamente a través de las capas del pavimento, siguiendo un patrón de bulbo de esfuerzos.

Efecto Principal: Es la principal causa del ahuellamiento por impacto (punch-out) en pavimentos flexibles delgados y del fisuramiento por fatiga en las losas de pavimentos rígidos.

b. Factores Determinantes:

- Velocidad del vehículo.
- Masa suspendida y no suspendida del vehículo.
- Geometría y severidad de la irregularidad superficial.
- Rigidez y condición del pavimento.
- Tipo de neumático y presión de inflado.

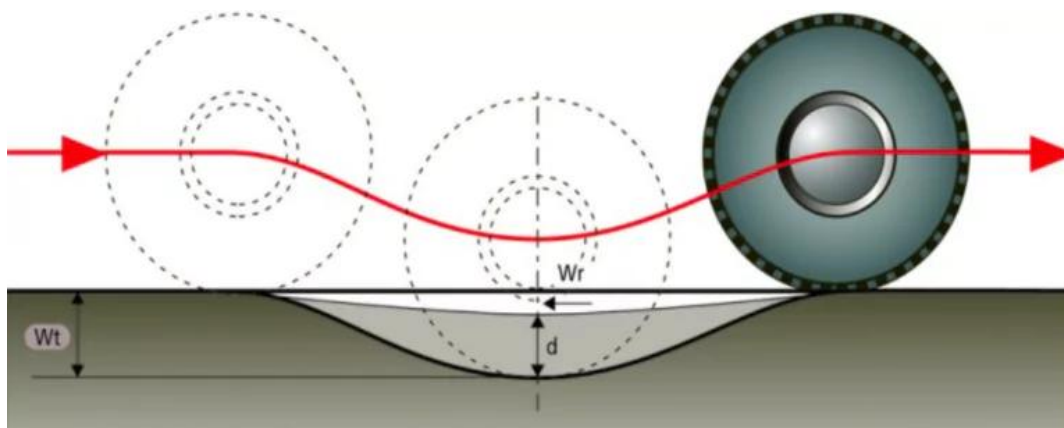
3.2.2.2 Respuesta deflectométrica. Es el conjunto de deformaciones que registra el equipo frente a la carga (en el centro y a distancias radiales), y se usa para evaluar condición estructural o para estimar propiedades in situ; la norma ASTM describe que las deflexiones se miden en el eje de carga y radialmente, y pueden correlacionarse con desempeño o con parámetros de capas (ASTM International, 2020). La respuesta deflectométrica en el contexto de ingeniería de pavimentos se refiere al patrón y magnitud de la deformación vertical (deflexión) que exhibe la estructura del pavimento y la subrasante bajo la aplicación de una carga controlada, típicamente medida mediante equipos deflectométricos como el (FWD) o el (LWD), esta respuesta es una medida directa de la rigidez in-situ y del comportamiento estructural integrado del sistema pavimento-subrasante. Como explica Huang (2004), el análisis de la deflexión medida bajo una carga dinámica simulada permite evaluar la capacidad estructural remanente, identificar capas débiles y estimar los módulos elásticos de las diferentes capas mediante procesos de retrocálculo.

3.2.2.2.1 Deflexiones. Según AASHTO (2020) las deflexiones constituyen la respuesta estructural primaria que vincula directamente las propiedades de los materiales, las condiciones ambientales y las cargas de tráfico con el desempeño. Son los desplazamientos verticales medidos por los sensores durante el pulso de carga; se registran

en el centro de carga y en puntos radiales para formar la “cubeta” de deflexión, base del diagnóstico estructural (ASTM International, 2020).

Figura 8

Efecto de la deflexión en un pavimento



Nota. Esquema del efecto de la deflexión bajo una rueda: se forma una cuenca de hundimiento (d) que influye en la trayectoria del vehículo. Reproducido de Medición de la deformación del suelo, por Rovem, s. f.

3.3 Definición de términos

Deflexión máxima (D_0): Es el desplazamiento vertical máximo registrado justo bajo el centro de la placa de carga del FWD, se usa como el dato principal para representar la respuesta estructural inmediata del pavimento ante el impacto. (FHWA, 2017).

Deflexiones máximas permisibles: Son valores límite de aceptación/criterio de control, donde la decisión técnica se toma comparando la deflexión representativa del sector con el valor admisible definido para el tránsito de diseño y la norma aplicable. (MVCS, 2010).

Cuenca de deflexión: Es el perfil formado por deflexiones medidas en el centro de carga y a varias distancias radiales; su forma ayuda a interpretar qué capas (superiores o inferiores) están dominando la deformación del sistema. (FHWA, 2017).

Módulo de elasticidad (E): Es la relación entre esfuerzo y deformación unitaria en el rango elástico; en términos prácticos indica rigidez: a mayor E, menor deformación elástica ante el mismo esfuerzo. (University of Cambridge, s. f.).

Retroanálisis (retrocálculo): Es el proceso de estimar propiedades estructurales (por ejemplo, módulos de capas) a partir del cuenco medido, ajustando un modelo hasta reproducir las deflexiones observadas. (FHWA, 2017).

Módulo resiliente (M_r): Es un parámetro que representa la rigidez “recuperable” del material bajo cargas repetidas, muy usado para caracterizar subrasante y capas granulares en diseño/evaluación. (FHWA, 2017).

Número estructural (SN): Es un índice global que resume la capacidad estructural aportada por las capas del pavimento, combinando espesores y coeficientes estructurales para representar la “fortaleza” de la estructura frente al tránsito. (MVCS, 2010).

Vida útil remanente: Es el “tiempo que falta” (o intervalo restante) hasta que sea necesaria una intervención definida, según el criterio/umbral de la agencia; evita confundir “vida” con múltiples hitos de la historia del pavimento. (FHWA, 2013).

Índice de capacidad estructural: Es un indicador derivado del cuenco que se calcula como diferencia entre deflexiones y se usa para aproximar la condición/rigidez relativa de capas superiores respecto a la estructura inferior. (Horak, 2008).

Capa de rodadura: Es la capa superior que está en contacto directo con el tránsito y el ambiente; su función es proporcionar superficie de rodamiento y proteger a las capas inferiores. (MVCS, 2010).

Base y sub-base: Son capas ubicadas bajo la superficie; la base aporta soporte estructural principal y la sub-base complementa el soporte y ayuda a distribuir cargas hacia la subrasante. (FHWA, 2006).

Subrasante: Es el suelo de fundación (subgrade) sobre el que se apoya toda la estructura del pavimento; su rigidez/condición influye directamente en la respuesta deflectométrica y el desempeño. (FHWA, 2006).

Carga simulada: Es un pulso dinámico generado por caída de masa transmitido mediante una placa circular, diseñado para simular el efecto de una carga vehicular y medir la respuesta por deflexiones. (FHWA, 2017).

Evaluación estructural: Es el diagnóstico de la capacidad portante/condición estructural del pavimento usando medición de deflexiones (p. ej., FWD) y análisis asociados (por ejemplo, retrocálculo) para sustentar decisiones de intervención. (FHWA, 2017).

Pavimentos: Es una estructura multicapa construida sobre la subrasante para distribuir cargas del tránsito y controlar deformaciones, asegurando desempeño y servicio. (FHWA, 2006).

Pavimento flexible: Es un pavimento compuesto típicamente por capas asfálticas y granulares, donde la carga se distribuye por deformación y transferencia progresiva de esfuerzos hacia capas inferiores. (FHWA, 2006).

IV. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de Investigación

La Investigación puede ser básica genera conocimiento teórico o aplicada usa conocimiento para resolver problemas concretos en contextos reales, aportando decisiones y mejoras verificables, en tesis profesionales de ingeniería, la aplicada se centra en medir, analizar y proponer soluciones o criterios de aceptación operativos. (Hernández y Mendoza, 2018). El tipo de investigación se define por la finalidad del estudio: puede orientarse a generar conocimiento (básica) o a resolver un problema práctico mediante aplicación directa del conocimiento (aplicada), buscando resultados utilizables en un contexto real (Arias y Covinos, 2021).

La tesis, es de tipo aplicada, porque evaluó in situ la condición estructural del pavimento mediante FWD y determinaron parámetros (módulos, SN efectivo y deflexiones corregidas) para decidir la conformidad del proyecto en la Vía Expresa Cusco, generando lineamientos de aceptación y acciones correctivas útiles para la gestión y recepción de la obra.

4.1.2 Nivel de Investigación

El nivel expresa la profundidad del estudio: exploratorio, descriptivo, correlacional o explicativo; con frecuencia, los trabajos aplicados combinan componentes descriptivos caracterización de variables, y correlacionales (Hernández y Mendoza, 2018). El nivel o alcance de investigación expresa la profundidad con la que se estudia el fenómeno: puede ser exploratorio primer acercamiento, descriptivo caracteriza, correlacional relaciona variables y explicativo busca causas o factores que determinan el comportamiento observado (Arias y Covinos, 2021).

La tesis es explicativa – correlacional ya que permite describir el estado actual de pavimento y explicar su condición en que se entrega frente a umbrales de aceptación y mediciones de referencia para determinar condición estructural.

4.1.3 Diseño de Investigación

El diseño no experimental observa fenómenos como ocurren, sin manipulación deliberada; y el corte transversal recolecta datos en un solo momento, permitiendo comparar mediciones entre unidades o grupos (Hernández y Mendoza, 2018). El diseño de investigación es la estrategia para responder el problema de estudio. En un diseño no experimental, las variables no se manipulan: se observan tal como ocurren en su contexto real; y si la medición se realiza en un solo momento o periodo corto, el diseño es transversal (Arias y Covinos, 2021).

La tesis adoptó un diseño no experimental, transversal y comparativo: se levantaron deflexiones en un periodo específico, se procesaron bajo un mismo protocolo y se compararon resultados entre tramos/carriles y frente a criterios de aceptación estructural.

4.1.4 Enfoque de investigación

Para Hernández el enfoque cuantitativo parte de hipótesis/preguntas y de variables operacionales, aplica instrumentos válidos y confiables, y procede con análisis estadístico para inferir sobre la población de estudio (Hernández y Mendoza, 2018).

En esta tesis, su enfoque es cuantitativo porque se operacionalizaron variables estructurales como su deflexión característica, módulos, capacidad estructural y se analizaron mediante procedimientos estandarizados, asegurando trazabilidad entre medición, procesamiento y decisión de aceptación.

4.2 Ámbito temporal y espacial

4.2.1 Ámbito temporal

Hernández subraya que el ámbito temporal delimita cuándo se recolectaron los datos y el tipo de corte; ello condiciona la validez de las inferencias respecto a la realidad estudiada (Hernández y Mendoza, 2018). El ámbito temporal delimita el periodo en el que se recolectan y analizan los datos, precisando el cuándo del estudio para mantener coherencia entre el fenómeno observado y la interpretación de resultados (Arias y Covinos, 2021).

En esta tesis, la recolección de datos se efectuó el año 2025.

4.2.2 Ámbito Espacial

Para Hernández el ámbito espacial precisa el lugar y las unidades de análisis, con el fin de asegurar representatividad y coherencia entre objetivos y muestra (Hernández y Mendoza, 2018). El ámbito espacial delimita el lugar o área donde se estudia el fenómeno, especificando el “dónde” para definir con claridad el alcance territorial del análisis (Arias y Covinos, 2021).

La tesis se realizó en la Vía Expresa Cusco en la ciudad de Cusco.

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población

Hernández define población como el conjunto de casos que comparten características pertinentes al estudio; su correcta definición evita sesgos y fundamenta la inferencialidad de los resultados (Hernández y Mendoza, 2018). La población es el conjunto total de elementos o unidades que comparten características de interés para el estudio y sobre los cuales se busca describir o concluir (Arias y Covinos, 2021).

Para la tesis la población correspondió al pavimento de la Vía Expresa Cusco considerados para evaluación.

4.3.2 Muestra

El muestreo sistemático consiste en seleccionar unidades a intervalos fijos (k) sobre un marco ordenado; en su versión probabilística se recomienda un arranque aleatorio dentro de los primeros k elementos y, luego, elegir cada k -ésima unidad, lo que distribuye las observaciones de forma regular en el espacio o a lo largo de un eje lineal; es un diseño estándar en poblaciones finitas y se emplea cuando se busca cobertura homogénea y simplicidad operativa (Lohr, 2021). La muestra es una parte representativa de la población, seleccionada para observar medir y así inferir conclusiones del conjunto, bajo un criterio de selección y tamaño técnicamente justificable (Arias y Covinos, 2021).

En la tesis se aplicó muestreo sistemático longitudinal a lo largo del eje vial, se fijó un intervalo de 25 m por calzada (50 m por carril) con patrón intercalado tres bolillos a lo largo de 5.190 km, y se ejecutaron 399 ensayos con FWD. Se cubrieron ambos sentidos con progresivas alternadas por carril para asegurar homogeneidad y comparabilidad por tramos; no se utilizó arranque aleatorio, por lo que el esquema quedó como sistemático determinístico se declara expresamente en el método.

4.4 Instrumentos

Según Hernández los instrumentos son medios válidos y confiables para operacionalizar variables; su selección exige justificar estandarización, precisión y procedimientos de aplicación (Hernández y Mendoza, 2018). Los instrumentos son los medios concretos que permiten recolectar datos (medir, registrar u observar) de manera ordenada; su adecuada selección garantiza que la información obtenida sea útil para el análisis del problema (Arias y Covinos, 2021).

En la tesis se utilizó los siguientes instrumentos:

- 01 deflectómetro FWD, con cargas de impacto de 20 a 70 kN, mediciones con 7 sismómetros.

- 01 GPS
- 01 Vehículo de mediciones.
- 01 Odómetro manual.
- 01 Cámara fotográfica.

4.5 Procedimientos

Hernández establece que los procedimientos deben detallar la secuencia de planificación, recolección y procesamiento de datos, de modo que el estudio sea replicable y auditable (Hernández y Mendoza, 2018). Los procedimientos describen, en forma secuencial y verificable, cómo se ejecutó la recolección y el procesamiento de datos, de modo que el estudio pueda entenderse, revisarse y replicarse (Arias y Covinos, 2021).

El servicio se ha desarrollado, mediante mediciones en campo con equipo FWD y el procesamiento en gabinete, por retrocálculos y su comparativas con las deflexiones admisibles. Los pavimentos, al momento de medición de las deflexiones, están en su etapa de culminación de obras, y aún no puestas al servicio.

Trabajos de Campo

- Las mediciones se realizan con un equipo deflectómetro de impacto - FWD, que impactan entre 20 a 70 kN, para nuestras carreteras en Perú utilizamos ensayamos con cargas de 40 para control de obras y con 50 kN para estudios.
- Previamente se hace una verificación de que el sistema de cargas y de todos los sensores de medición, estén calibrados y operativos, siguiendo los protocolos de calentamiento de los buffers de cargas, antes de las mediciones.
- La medición de las deflexiones superficiales de los pavimentos, se realizan aplicando cargas de impacto estandarizadas 40 y 50 kN, y las deflexiones son registradas para los 7 sensores del FWD, ensayos realizados espaciados a cada 25 metros y a cada 50 m por carril, en forma de tres bolillos, en un total de 5.190

km de calzada de pavimentos, tanto para la Vía Principal Derecha como Izquierda.

- Los ensayos deflectométricos se realizan con 04 niveles de carga, dos (2) son cargas de acomodos tanto del plato de carga y de la viga de sensores de 20 y 70 kN, éstas últimas no se registran, luego vienen las dos (2) cargas de mediciones y registro para 40 y 50 kN.

Trabajos de Gabinete

- Procesamiento de los registros de campo y cálculos para la determinación de las deflexiones, considerando la variación de cargas y temperaturas, así como la determinación de las características estructurales de los pavimentos.
- Con las mediciones de deflexiones, mediante retrocálculos se determinan las características estructurales de los pavimentos, así como la comparativa de las deflexiones corregidas por estandarización de cargas y temperaturas con las deflexiones admisibles, por métodos diferentes.

4.6 Análisis de Datos

Para Hernández-Sampieri, el análisis de datos cuantitativo comprende estadística descriptiva e inferencial y procedimientos de modelación/estimaciones consistentes con las variables y los objetivos, manteniendo coherencia con las hipótesis y el diseño (Hernández y Mendoza, 2018). El análisis de datos implica ordenar, depurar y transformar la información recolectada para interpretar resultados y responder el problema de investigación, usando criterios técnicos acordes con el diseño y el tipo de datos (Arias y Covinos, 2021).

En la tesis, Se aplicará:

- Análisis estructural por retrocálculo: interpretación de módulos de elasticidad mediante BISAR/EvenCalc (AASHTO, 1993; Baladi, 2001).

- Criterios de aceptación: Los resultados se contrastarán con valores mínimos aceptables de deflexión o capacidad estructural según la FHWA (2001) y TRL Road Note 29 (Jones y Jones, 1989).

4.7 Consideraciones Éticas

Hernández-Sampieri enfatiza la ética en la recolección, análisis y reporte veraz de la información, el reconocimiento de fuentes, la confidencialidad y el respeto a normas y contextos de intervención (Hernández y Mendoza, 2018). Las consideraciones éticas aseguran que el estudio se ejecute con integridad: veracidad de datos, respeto por la información, trazabilidad del proceso y ausencia de manipulación o sesgo deliberado en resultados (Arias y Covinos, 2021).

En la tesis, se resguardaron los registros, se documentaron los procedimientos, se reconocieron las fuentes empleadas y se respetaron las condiciones operativas de la vía y de terceros, asegurando integridad y trazabilidad del proceso metodológico.

V. Resultados y discusión

5.1 Resultados

Planificación de mediciones y evaluaciones

Para planificar las mediciones por cada calzada y por cada Carril, se han tomado en cuenta los registros de progresivas georreferenciados en archivos KMZ. Los espaciamientos entre puntos de ensayo son de 50 m por carril ensayadas en forma de tresbolillo, lo que conforman ensayos a cada 25 m por calzada. Las mediciones fueron realizadas según la secuencia de progresivas siguientes:

Vía principal derecha:

Carril 1: 0+000, 0+050, 0+100, 0+150, 0+200, 0+250, 0+300, 0+350,
0+400....

Carril 2: 0+025, 0+075, 0+125, 0+175, 0+225, 0+275, 0+325, 0+375,
0+425....

Vía principal izquierda:

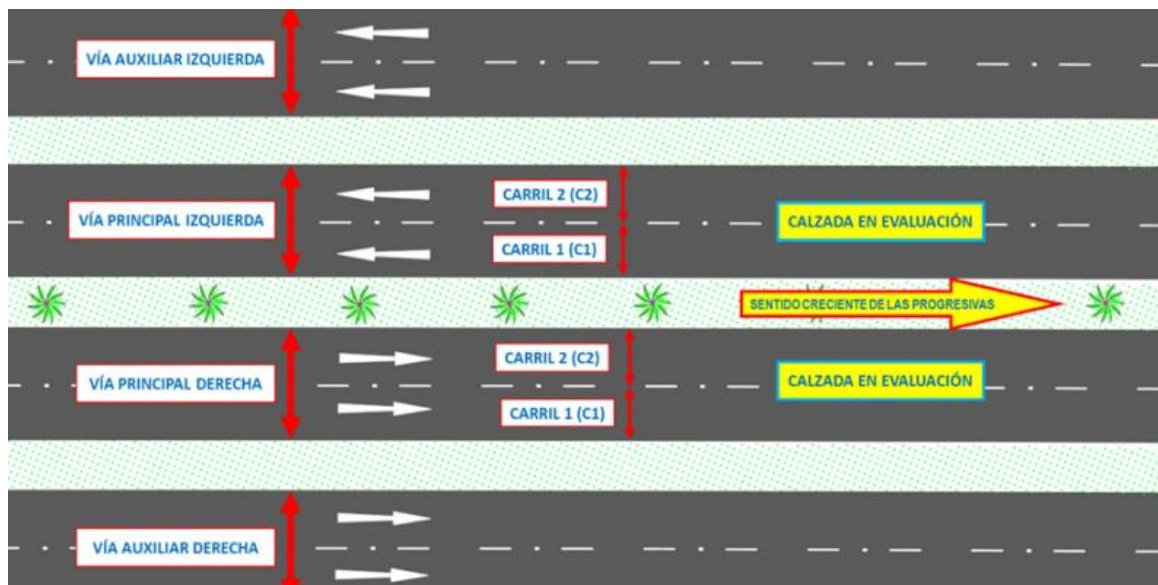
Carril 1: 0+000, 0+050, 0+100, 0+150, 0+200, 0+250, 0+300, 0+350,
0+400....

Carril 2: 0+025, 0+075, 0+125, 0+175, 0+225, 0+275, 0+325, 0+375,
0+425....

En la siguiente figura se muestra los nombres asignados a la vía, a nivel de calzada y carril.

Figura 9

Esquema típico de la vía en evaluación



Nota. En la figura se muestra la autopista y la distribución de 4 carriles para la izquierda y derecha en total 8 carriles.

Las mediciones se han realizado con un equipo deflectómetro de impacto - FWD-50 de la marca KUAB.

Proceso de mediciones en campo

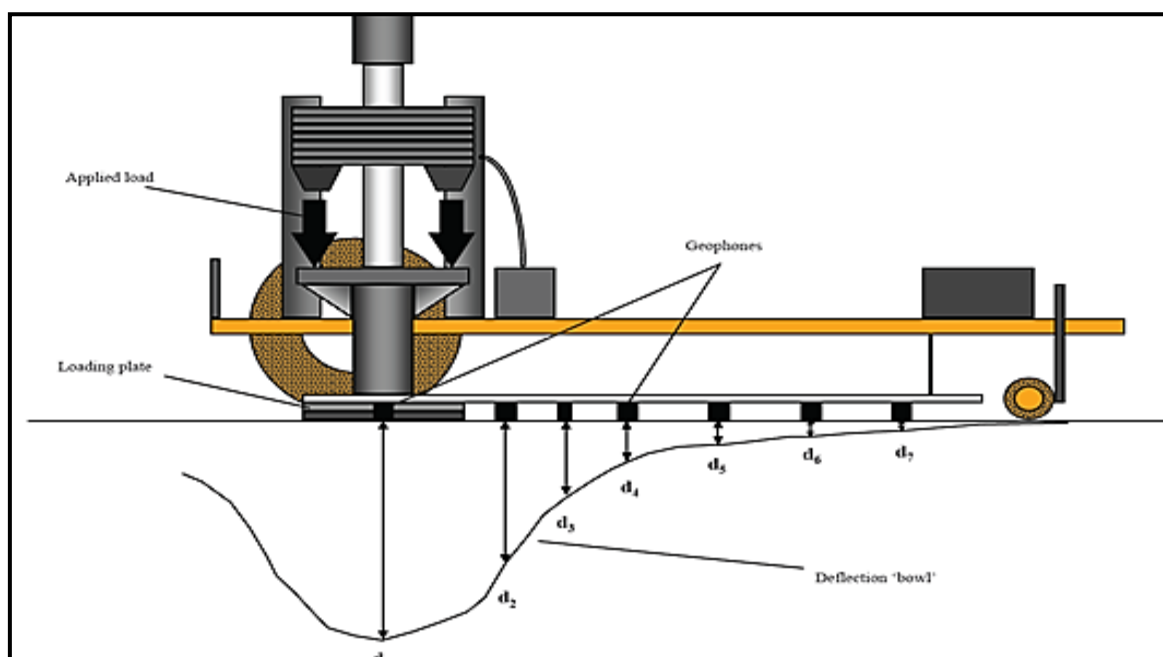
El proceso de mediciones de deflexiones, se han efectuado siguiendo las indicaciones dadas en la normativa ASTM-4694, los requeridos en los TDR del proyecto.

- Los espaciamientos entre ensayos, son los indicados por el cliente o especialista y según objetivo del ensayo.
- Previo a las mediciones, se realizan los protocolos de trabajabilidad (calentamiento) de los elastómeros de buffers de impacto, sistemas comandados desde una computadora portátil.
- En cada punto de ensayo, se ubica el equipo FWD y su plato de carga.
- La medición se inicia activando el elevador de masas hasta una determinada altura programada, luego se dejan caer las masas, de forma automática sobre la

superficie del pavimento, elevaciones e impactos de forma secuencial de cargas de impactos de 20, 40, 50, 70 kN, con dichos impactos se activan los sensores o sismómetros de deflexión.

Figura 10

Esquema del cuenco de deflexiones ante el impacto del deflectómetro



Nota. En la figura se muestra el registro de impacto donde d_0 es el mayor impacto que recibe el pavimento, los restantes son sensores que obtienen cada vez menos deflexión a manera que se aleja del impacto del equipo. Por Falling Weight Deflectometer Schematic (Ferne y Langdale, 2010).

Tabla 6

Factores de Corrección "C", para el Retrocálculo

CALZADA	CBR (%)	Mr LAB (PSI)	Mr FWD (PSI)	FACTOR C
Vía Principal Derecha	45	29,204	49814	0.59
Vía Principal Izquierda	45	29,204	54763	0.53

Nota. En la tabla Mr FWD, es el promedio de los Mr retrocalculados de los puntos de ensayo con el FWD, por cada Tramo, en este caso por cada Calzada.

Deflexiones máximas permisibles

Se presentan las deflexiones máximas permisibles (x 10⁻² mm), a los niveles de, la Subrasante, Subbase granular, Base granular y Carpeta asfáltica, tal como se muestra en el cuadro siguiente.

Tabla 7

Deflexiones máximas permisibles

Vía	Sección	Deflexiones máximas permisibles (x10 ⁻² mm)			
		Carpeta asfáltica	Base granular	Subbase granular	Subrasante
central	A1	23	36	51	68
central	B1	23	36	51	68
central	C1	25	36	51	68
central	D1	25	36	51	68
central	A2	26	34	51	68
central	B2	26	34	51	68
central	C2	28	34	51	68

Nota. Informe de la supervisión, se presentan las deflexiones máximas permisibles, por la Carta J3D166-LT-857-2022.

Resultados de características estructurales de pavimentos por retrocálculo de deflexiones FWD – método AASHTO93

Las mediciones de las deflexiones se han realizado en el mes de diciembre del 2024, en 5.190 km de 2 Vías principales, por cada calzada los puntos están espaciados a cada 25 metros, quedando espaciados a cada 50 metros por cada carril, de forma intercalada en forma de tres bolillos. Las deflexiones por cada sección, se han registrado con 7 sismómetros, así como las temperaturas de la superficie del pavimento y del ambiente, y los ensayos se realizaron con cargas de impacto de 40 y 50 kN.

Las capas de los pavimentos, están conformados por, una capa de mezcla SMA de 4 cm, luego la base intermedia conformada por una mezcla MAC-2 de 6 cm y más abajo una capa de MAC-1 de 7 cm, y como capas base, tiene un base granular de 27 cm y sub base de

25 cm de espesores, que en total hacen 69 cm de espesor de pavimento, sobre una subrasante de 45% de CBR.

Con las deflexiones medidas y el cuenco de deflexiones con cargas de impacto 40 kN, se han hecho las correcciones de las deflexiones por carga y temperaturas, con los cuales se han determinado por retrocálculos y análisis, los Módulos estructurales de los pavimentos, así como los Módulos de la subrasante, Número Estructural y Radio de curvatura, cuyos resultados se muestran en las siguientes Tablas, tanto para la Calzada Derecha y Calzada Izquierda.

Estos valores se calculan utilizando la ecuación 7. (Módulo resiliente de la subrasante)

Tabla 9

Planilla de Deflexiones y Retrocálculo–AASHTO93–Vía Principal izquierda

DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS- POR RETROCÁLCULO DE DEFLEXIONES FWD - MÉTODO AASHTO93-CARRETERA VÍA EXPRESA - CUSCO																																								
RUTA: VÍA PRINCIPAL IZQUIERDA														EQUIPO: FWD KUAB																										
PROG. KM 0+000 - KM 5+200														Fecha 03/12/2024																										
														CARGA ESTANDAR: 40 KN																										
														RADIO DE PLATO DE CARGA: 15 cm																										
Prog.	Dist	Eje	Carga	Deflexiones originales						Temp. Aire	Temp. Superf.	Espesores			Deflexiones corregidas						Dmax (FWD)	ae	r	Mr	C	Mr Sub Rasante	Mr Sub Rasante	Epav	Epav	SNeff	Dmax VB	RoC	CBR	Coordenadas Geográficas						
				D ₀	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅			D ₆	Carpeta	Base + S.S.	Fact Corr Temp	Fact Corr Carga	Carga Corr	D ₀ 0 cm	D ₁ 20 cm	D ₂ 30 cm														D ₃ 45 cm	D ₄ 60 cm	D ₅ 90 cm	D ₆ 120 cm	psi	cm	cm
0+005	0	C1	41.10	193	149	122	84	65	32	26	23.4	29.3	17	52	0.85	0.97	40	160	124	119	81	63	31	26	160	98.32	90	51559	0.53	27496	190	144007	993	6.41	11	552	41.0	-13.533	-71.959	3334
0+025	20	C2	40.34	203	146	114	78	58	31	27	21.0	32.7	17	52	0.80	0.99	40	161	115	113	77	58	31	26	161	97.77	90	51061	0.53	27230	188	140151	966	6.35	11	440	40.3	-13.533	-71.959	3330
0+050	25	C1	40.76	210	157	130	90	66	31	24	23.2	44.8	17	52	0.60	0.98	40	125	93	128	88	65	31	24	125	109.75	90	51035	0.53	27216	188	199664	1377	7.14	8	634	40.3	-13.533	-71.959	3337
0+075	25	C2	40.20	179	140	114	78	59	29	25	20.9	32.7	17	52	0.80	1.00	40	142	112	113	77	59	29	24	142	100.18	90	54201	0.53	28905	199	160352	1106	6.64	9	647	44.3	-13.533	-71.959	3328
0+100	25	C1	40.73	189	142	115	77	57	28	25	23.6	43.4	17	52	0.63	0.98	40	117	87	113	76	56	28	24	117	107.36	90	57190	0.53	30499	210	209157	1442	7.26	7	680	48.2	-13.533	-71.958	3337
0+125	25	C2	40.50	231	174	140	97	69	33	14	20.9	32.6	17	52	0.80	0.99	40	182	137	139	96	68	33	14	182	95.59	90	47596	0.53	25382	175	121887	840	6.06	13	441	36.1	-13.533	-71.958	3327
0+150	25	C1	40.55	221	166	133	89	64	30	25	24.4	44.1	17	52	0.62	0.99	40	134	101	131	87	63	29	24	134	103.57	90	53748	0.53	28663	198	176053	1214	6.85	9	603	43.7	-13.533	-71.958	3336
0+175	25	C2	40.85	208	160	130	90	67	34	26	20.6	32.0	17	52	0.81	0.98	40	165	127	127	88	66	33	26	165	100.16	90	47662	0.53	25417	175	140905	972	6.36	12	533	36.2	-13.533	-71.958	3328
0+200	25	C1	40.53	204	160	131	91	67	32	26	25.1	44.9	17	52	0.60	0.99	40	121	95	129	90	66	32	25	121	112.19	90	49717	0.53	26513	183	207978	1434	7.24	8	771	38.7	-13.533	-71.957	3334
0+225	25	C2	40.73	235	184	156	115	91	46	37	20.0	31.1	17	52	0.82	0.98	40	190	149	153	113	89	46	36	190	108.21	90	34508	0.53	18403	127	129294	891	6.18	14	481	21.9	-13.533	-71.957	3324
0+250	25	C1	39.99	210	163	131	87	61	24	13	25.4	44.8	17	52	0.60	1.00	40	127	99	131	87	61	24	13	127	97.36	90	64814	0.53	34564	238	175615	1211	6.85	8	710	58.6	-13.533	-71.957	3332
0+275	25	C2	40.41	203	153	122	84	62	25	18	20.2	31.4	17	52	0.82	0.99	40	165	123	121	83	61	25	18	165	89.26	90	62058	0.53	33095	228	128687	887	6.17	12	485	54.7	-13.533	-71.957	3326
0+290	15	C2	40.42	227	175	138	92	67	26	19	19.5	31.4	17	52	0.82	0.99	40	184	142	136	91	67	26	19	184	86.47	90	60059	0.53	32029	221	112902	778	5.91	13	475	52.0	-13.533	-71.957	3320
0+295	5	C1	39.76	199	149	118	78	54	20	16	24.6	39.5	17	52	0.69	1.01	40	138	104	119	79	54	20	17	138	87.16	90	77221	0.53	41181	284	148796	1026	6.48	9	579	77.0	-13.533	-71.957	3334
0+625	330	C2	40.14	244	185	145	94	63	23	13	18.6	32.4	17	52	0.80	1.00	40	195	148	144	94	62	23	13	195	80.11	90	68287	0.53	36416	251	101289	698	5.70	15	427	63.5	-13.533	-71.954	3325
0+625	0	C1	40.38	243	172	135	83	56	18	13	25.4	42.3	17	52	0.64	0.99	40	155	109	134	82	55	18	13	155	80.40	90	85716	0.53	45711	315	128572	886	6.17	11	442	90.6	-13.533	-71.954	3330
0+650	25	C1	40.48	228	167	129	81	52	17	12	22.9	42.6	17	52	0.64	0.99	40	144	106	128	80	51	17	12	144	80.00	90	93552	0.53	49890	344	138183	953	6.32	10	523	103.9	-13.533	-71.953	3327
0+675	25	C2	40.11	224	171	133	87	60	25	12	18.2	32.3	17	52	0.80	1.00	40	179	137	133	87	60	25	12	179	85.47	90	63028	0.53	33612	232	114289	788	5.93	13	471	56.1	-13.533	-71.953	3320
0+700	25	C1	40.33	267	190	143	84	54	19	15	23.5	42.2	17	52	0.65	0.99	40	171	122	142	83	54	18	15	171	77.82	90	84315	0.53	44964	310	114267	788	5.93	12	408	88.3	-13.533	-71.953	3323
0+725	25	C2	40.69	207	161	130	88	63	27	20	18.7	28.8	17	52	0.86	0.98	40	175	137	128	87	62	27	20	175	88.96	90	59206	0.53	31574	218	121525	838	6.06	13	517	50.8	-13.533	-71.953	3320
0+750	25	C1	40.41	279	201	153	93	60	23	22	23.5	43.2	17	52	0.63	0.99	40	174	126	152	92	59	23	21	174	84.11	90	68025	0.53	36277	250	117380	809	5.99	12	414	63.1	-13.533	-71.952	3322
0+775	25	C2	40.67	229	169	130	85	56	24	22	18.8	31.8	17	52	0.81	0.98	40	183	135	128	84	56	24	22	183	83.83	90	65853	0.53	35118	242	112464	775	5.90	13	418	60.0	-13.533	-71.952	3318
0+800	25	C1	40.56	217	165	131	84	59	25	22	24.3	42.8	17	52	0.64	0.99	40	136	103	130	83	58	24	22	136	95.22	90	64565	0.53	34432	237	163406	1127	6.68	9	614	58.2	-13.533	-71.952	3322
0+825	25	C2	40.49	236	175	138	91	63	27	24	18.2	31.9	17	52	0.81	0.99	40	189	140	136	89	62	27	24	189	87.01	90	57782	0.53	30814	212	110727	763	5.87	14	409	48.9	-13.533	-71.952	3319
0+850	25	C1	40.52	233	177	139	88	59	22	17	23.6	43.3	17	52	0.63	0.99	40	145	110	138	87	58	21	17	145	88.04	90	73190	0.53	39031	269	145465	1003	6.43	10	568	70.8	-13.533	-71.952	3320
0+875	25	C2	40.79	201	154	121	79	56	26	21	18.2	30.3	17	52	0.84	0.98	40	164	126	119	78	55	26	21	164	89.78	90	61860	0.53	32989	227	130585	900	6.20	12	523	54.4	-13.533	-71.951	3317
0+900	25	C1	40.44	230	175	139	91	66	29	23	24.7	43.8	17	52	0.62	0.99	40	141	107	138	90	65	28	23	141	100.29	90	54898	0.53	29276	202	162966	1124	6.68	9	589	45.2	-13.533	-71.951	3320
0+925	25	C2	40.67	227	178	144	100	73	35	31	19.3	31.6	17	52	0.81	0.98	40	182	143	142	99	72	35	31	182	98.11	90	45177	0.53	24092	166	125360	864	6.12	13	513	33.3	-13.533	-71.951	3317
0+950	25	C1	40.19	253	183	146	97	69	30	26	24.8	45.1	17	52	0.60	1.00	40	151	110	145	96	69	30	26	151	99.83	90	51490	0.53	27459	189	150696	1039	6.51	10	483	40.9	-13.533	-71.951	3320
0+975	25	C2	40.90	241	185	148	104	76	37	32	19.7	32.0	17	52	0.81	0.98	40	190	147	144	102	74	37	31	190	98.07	90	43330	0.53	23107	159	120080	828	6.03	14	456	31.2	-13.533	-71.950	3316
1+000	25	C1	40.91	244	177	142	93	67	32	29	23.9	39.0	17	52	0.70	0.98	40	166	121	139	91	65	31	28	166	97.54	90	50296	0.53	26822	185	137076	945	6.30	12	441	39.4	-13.533	-71.950	3319
1+025	25	C2	40.82	209	168	137	98	73	35	31	19.3	31.6	17	52	0.81	0.98	40	167	134	134	96	72	35	30	167	101.58	90	45446	0.53	24236	167	140279	967	6.35	12	600	33.6	-13.533	-71.950	3316
1+050	25	C1	40.63	257	187	147	92	62	27	24	24.1	46.8	17	52	0.57	0.98	40	145	106	145	90	61	27	23	145	96.36	90	58832	0.53	31374	216	154440	1065	6.56	10	508	50.3</			

Evaluación de características estructurales – AASHTO 93

Tabla 10

Ensayos de campo CBR

Ensayo CBR							
Calicata	Muestra	Prog.	CBR	Calicata	Muestra	Prog.	CBR
C-04	M1	0+650	42%	C-02	M1	0+625	43%
C-06	M1	1-450	38%	C-03	M1	0+825	39%
C-07	M1	1+700	46%	C-04	M1	1+350	51%
C-08	M1	1+950	52%	C-06	M1	1+800	47%
C-09	M1	2+200	35%	C-07	M1	2+000	42%
C-10	M1	2+450	41%	C-08	M1	2+500	37%
C-12	M1	2+950	57%	C-09	M1	2+850	49%
C-16	M1	3+950	51%	C-10	M1	2+900	41%
C-17	M1	4+200	43%	C-11	M1	3+000	45%
C-18	M1	4+450	39%	C-12	M1	3+100	53%
C-20	M1	4+950	47%	C-13	M1	3+175	52%
C-21	M1	5+190	44%	C-14	M1	3+650	46%
				C-15	M1	3+800	43%
				C-16	M1	4+550	39%
Promedio							45%

Nota. En la tabla se muestra las calicatas del estudio de suelos laboratorio donde se obtiene los % de CBR en progresivas correspondientes.

Análisis de la vía principal derecha

Tabla 11

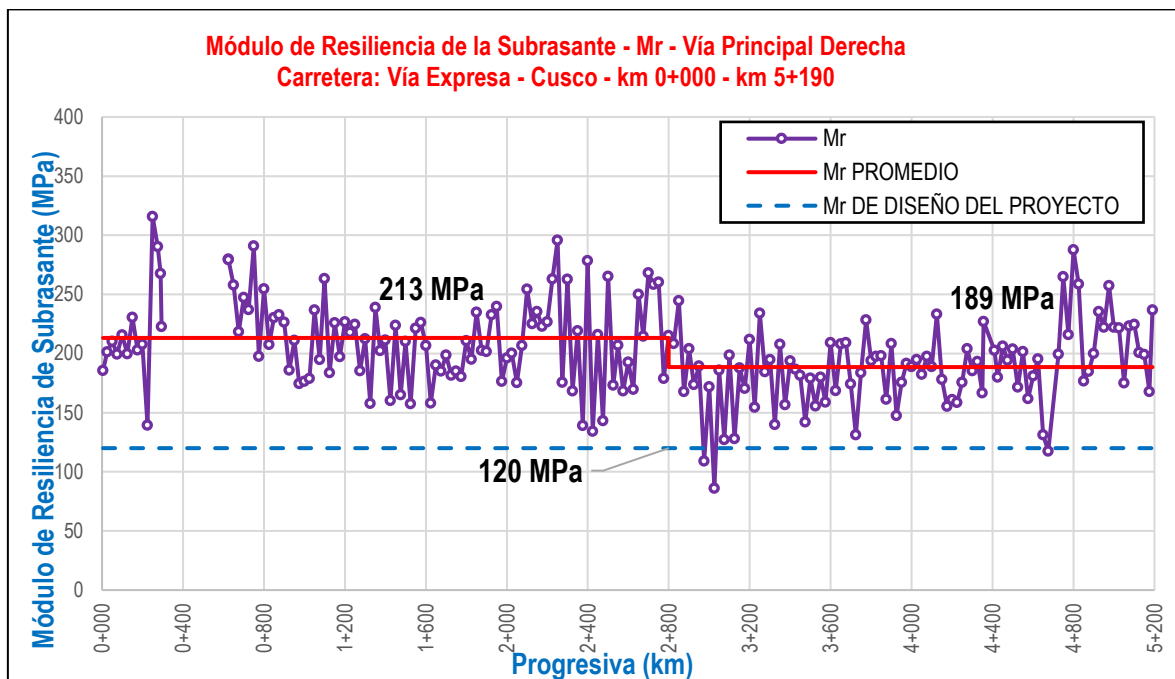
Resumen de la Evaluación de Parámetros Estructurales–Vía Principal Derecha

Calzada	Tramo	Inicio (km)	Fin (km)	Longitud (m)	Parámetro	Unidad	Cant. Ensayos	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv Std	Coef. Varianza	Diseño (Proyecto)
Vía Principal Derecha	A1	0+000	2+800	2800	Mr	MPa	103	213	134	316	37	0.17	120
					Epav	MPa	103	910	545	1488	220	0.24	695
					SNeff	-	103	6.19	5.25	7.33	0.5	0.08	5.69
					RoC	m	103	427	294	679	82	0.19	-
					CBR	%	103	49.8	23.9	90.9	13.6	0.27	-
	B1	2+800	5+190	2390	Mr	MPa	95	189	86	288	34	0.18	120
					Epav	MPa	95	780	475	1102	143	0.18	695
					SNeff	-	95	5.89	5.01	6.63	0.4	0.06	5.69
					RoC	m	95	341	203	464	57	0.17	-
					CBR	%	95	41.2	11.9	78.6	11.33	0.27	-

Nota. En la tabla se muestra las evaluaciones estructurales de la vía derecha de A1 y B1.

Figura 11

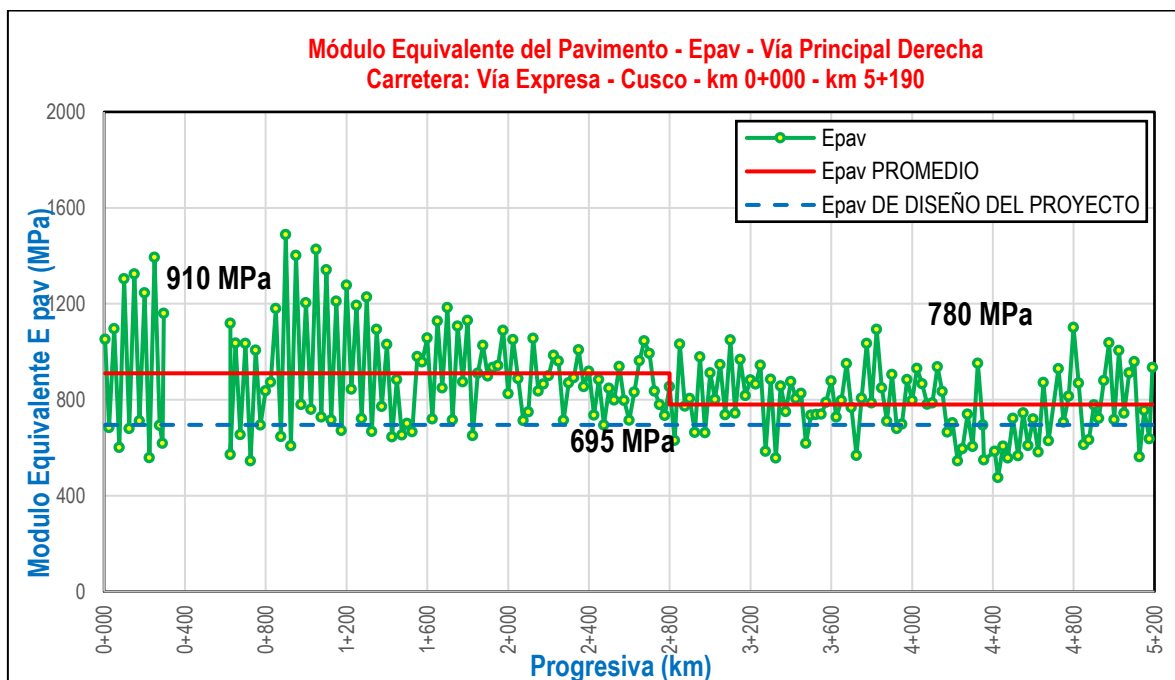
Módulo Resiliente de la Subrasante – Vía Principal Derecha



Nota. Módulo resiliente, módulo resiliente promedio y módulo resiliente de diseño.

Figura 12

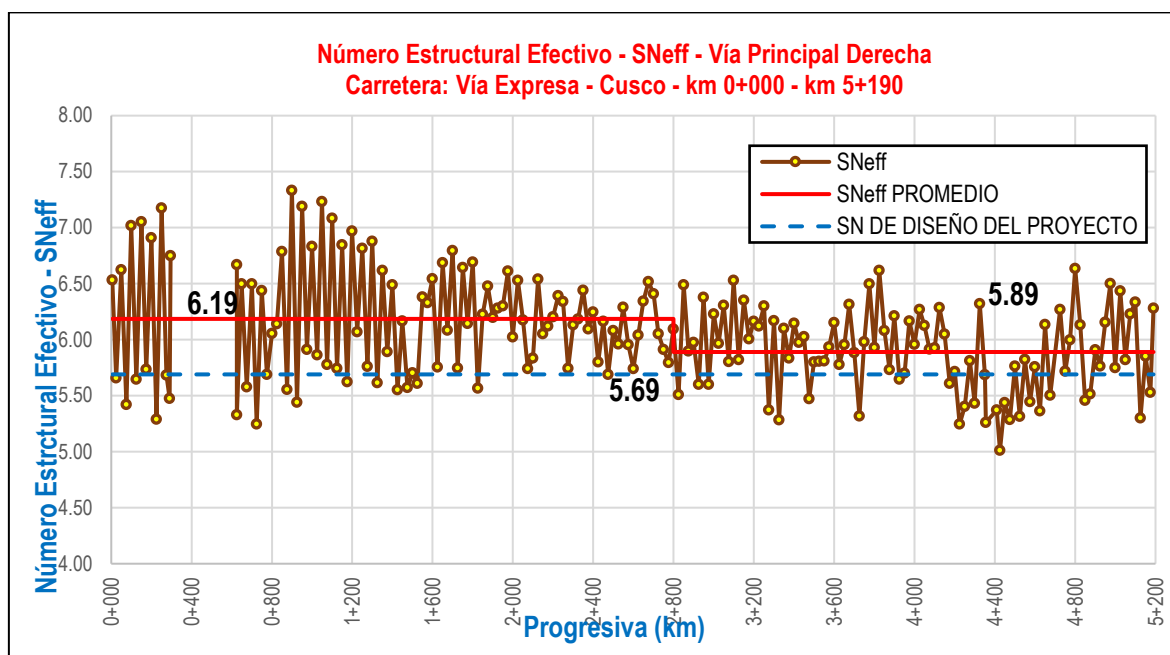
Módulo Equivalente del Pavimento – Vía Principal Derecha



Nota. En la figura se muestra el módulo equivalente del pavimento, módulo equivalente promedio y módulo equivalente de diseño.

Figura 13

Número Estructural Efectivo – Vía Principal Derecha



Nota. En la figura se muestra el número estructural efectivo promedio que se encuentra por encima del número estructural de diseño del proyecto.

Análisis de la vía principal izquierda

Tabla 12

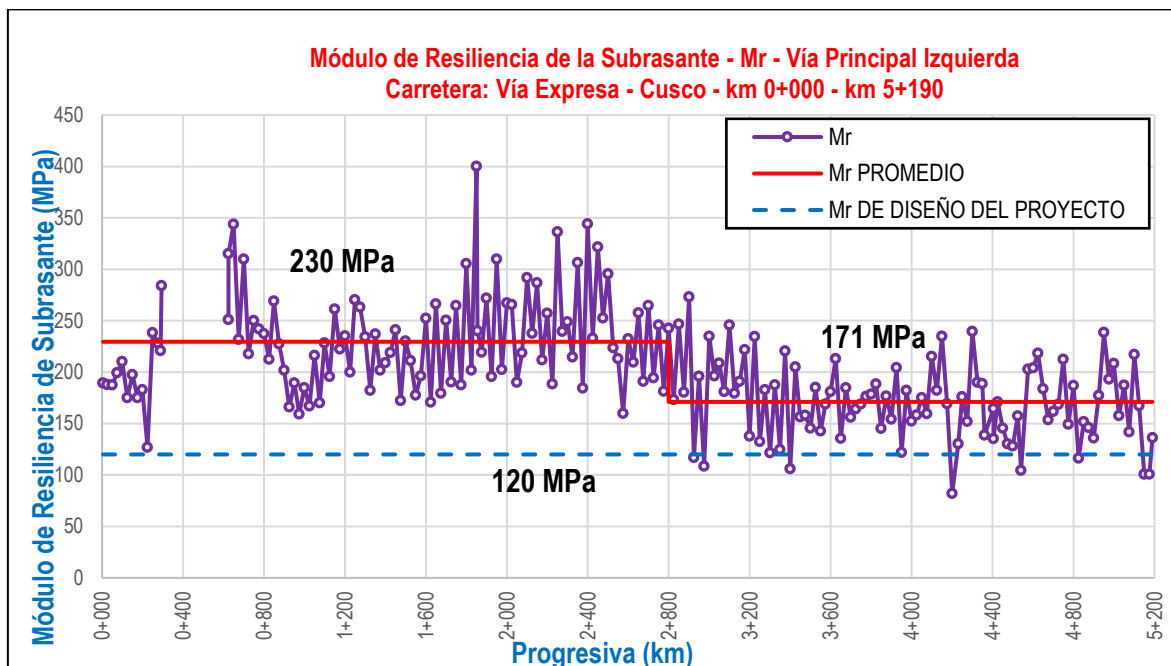
Resumen de la Evaluación de Parámetros Estructurales – Vía Principal izquierda

Calzada	Tramo	Inicio (km)	Fin (km)	Longitud (m)	Parámetro	Unidad	Cant. Ensayos	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv Std	Coef. Varianza	Diseño (Proyecto)
Vía Principal Izquierda	A1	0+000	2+800	2800	Mr	MPa	104	230	127	400	47	0.21	120
					Epav	MPa	104	1003	582	1659	217	0.22	695
					S _{Neff}	-	104	6.4	5.36	7.6	0.5	0.07	5.69
					RoC	m	104	524	263	836	115	0.22	-
					CBR	%	104	56.2	21.9	131.7	18.6	0.33	-
	B1	2+800	5+190	2390	Mr	MPa	97	171	82	273	38	0.22	120
					Epav	MPa	97	804	426	1259	169	0.21	695
					S _{Neff}	-	97	5.94	4.83	6.94	0.4	0.07	5.69
					RoC	m	97	436	250	1035	115	0.26	-
					CBR	%	97	35.6	11.1	72.4	12.1	0.34	-

Nota. En la tabla se muestra las evaluaciones estructurales de la vía Izquierda de A1 y B1.

Figura 14

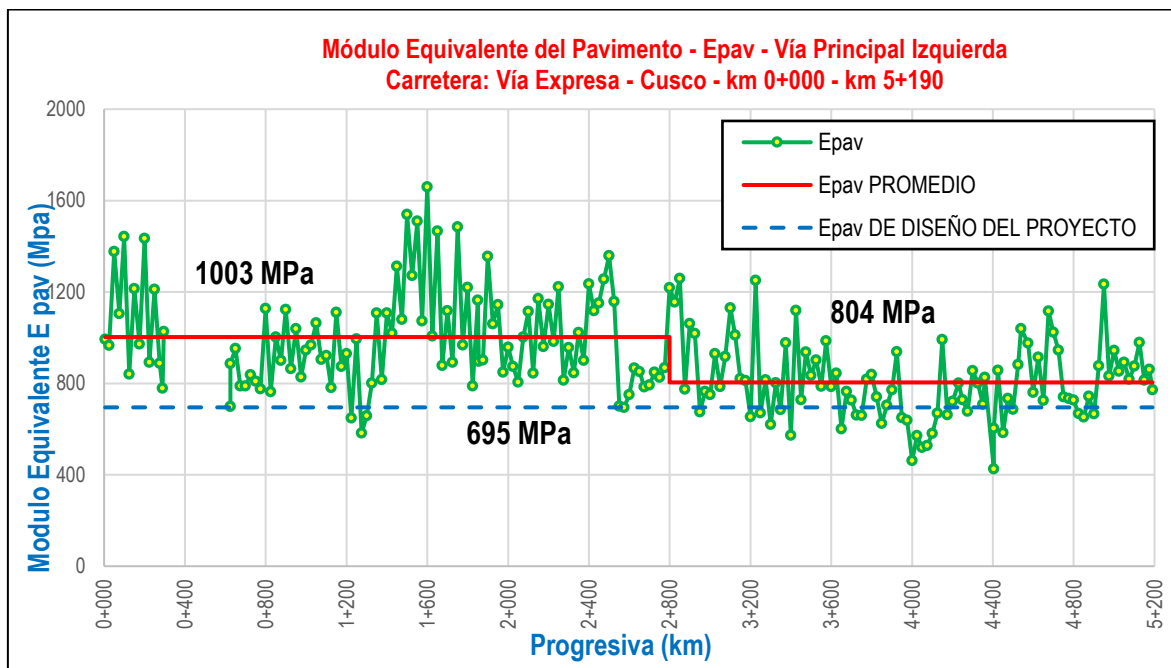
Módulo Resiliente de la Subrasante – Vía Principal Izquierda



Nota. Módulo resiliente, módulo resiliente promedio y módulo resiliente de diseño.

Figura 15

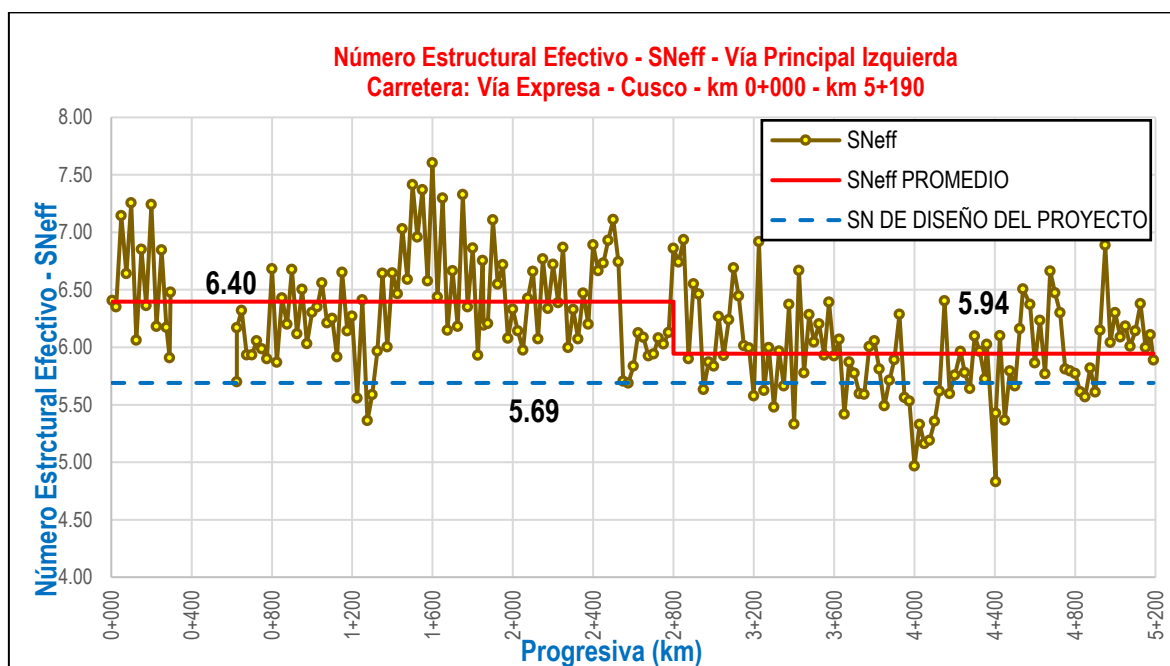
Módulo Equivalente del Pavimento – Vía Principal Izquierda



Nota. En la figura se muestra el módulo equivalente del pavimento, módulo equivalente promedio y módulo equivalente de diseño.

Figura 16

Número Estructural Efectivo – Vía Principal Izquierda



Nota. En la figura se muestra el número estructural efectivo promedio que se encuentra por encima del número estructural de diseño del proyecto.

Resultados de la evaluación estructural, por deflexiones

Análisis de la vía principal derecha

Figura 17

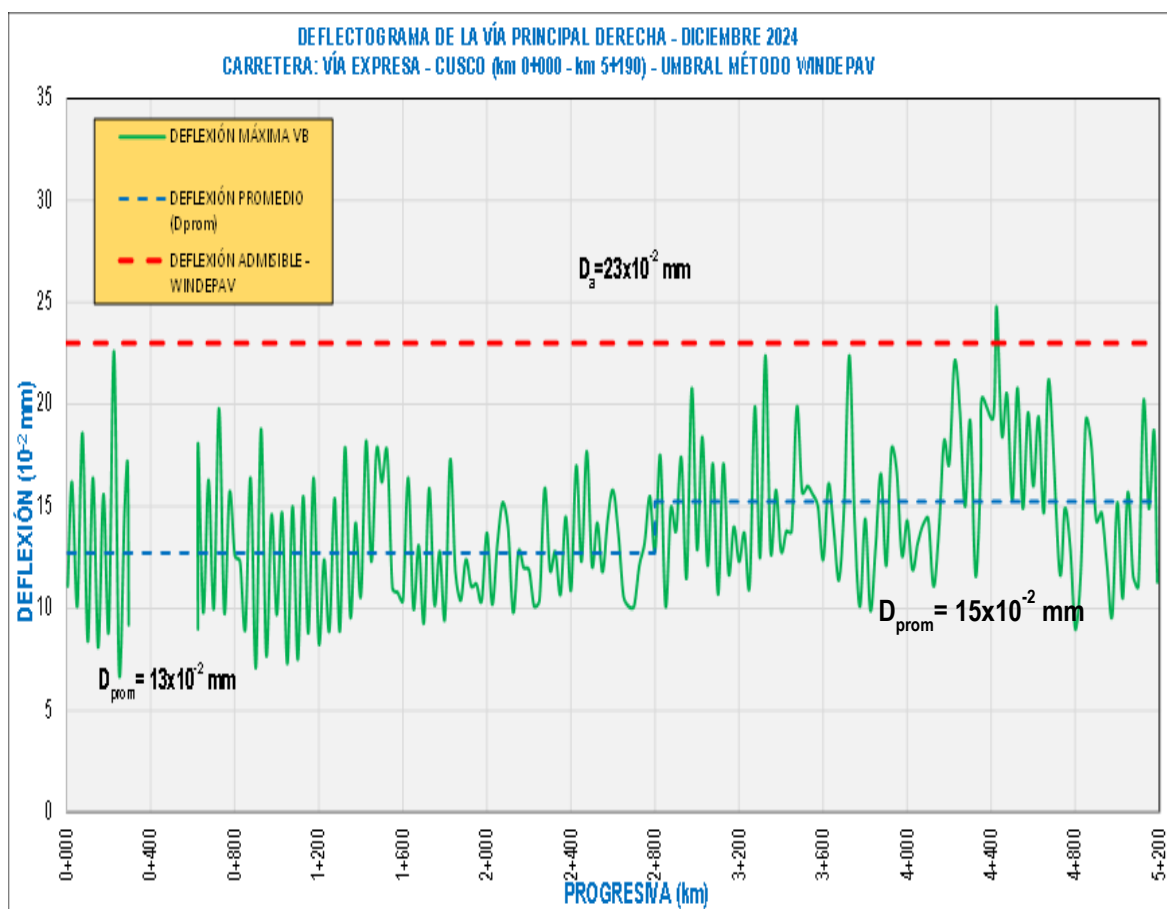
Evaluación Estructural por Deflexiones – Vía Principal Derecha

Tramo	Inicio (km)	Fin (km)	Longitud (m)	Parámetro	Unidad	Cant. Ensayos	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv Std	Coef. Varianza	WINDEPAV	
Vía Principal Derecha	A1	0+000	2+800	2800	DVB	10 ⁻² mm	103	13	7	23	3.3	0.26	23
	B1	2+800	5+190	2390	DVB	10 ⁻² mm	95	15	9	25	3.5	0.23	23

Nota. En la tabla se muestra la desviación estándar y el coeficiente de varianza.

Figura 18

Deflexión Máxima – Vía Principal Derecha



Nota. En la figura se muestra el límite de deflexión admisible WINDEPAV, donde la deflexión máxima viga Benkelman sobrepasa solo en la progresiva 4+400.

Análisis de la vía principal izquierda

Tabla 13

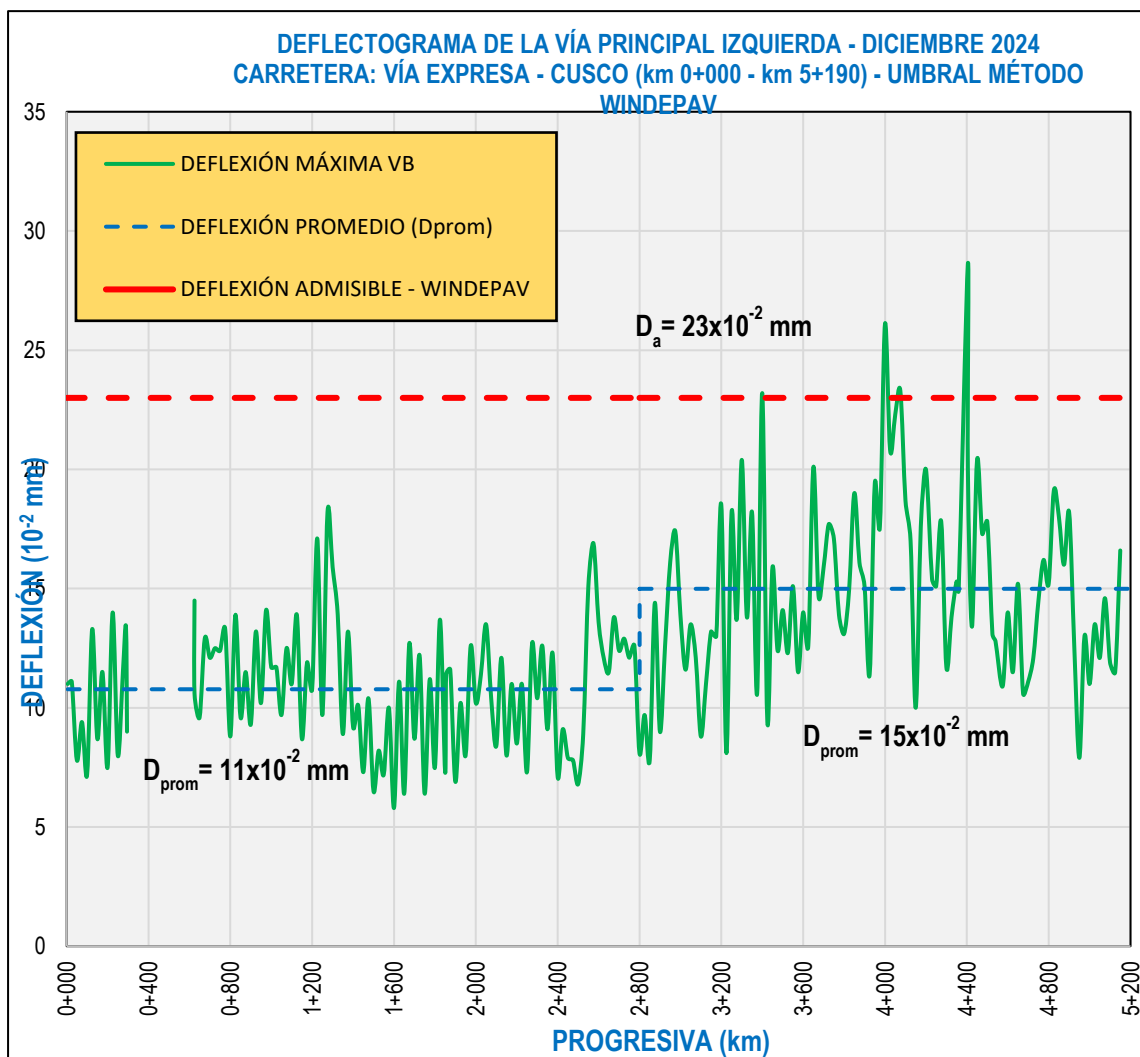
Evaluación Estructural por Deflexiones – Vía Principal izquierda

	Tramo	Inicio (km)	Fin (km)	Longitud (m)	Parámetro	Unidad	Cant. Ensayos	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv Std	Coef. Varianz	WINDEPAV
Vía Principal Izquierda	A1	0+000	2+800	2800	DVB	10^{-2} mm	104	11	6	18	2.6	0.24	23
	B1	2+800	5+190	2390	DVB	10^{-2} mm	97	15	8	29	3.9	0.26	23

Nota. En la tabla se muestra la desviación estándar y el coeficiente de varianza.

Figura 19

Deflexión Máxima – Vía Principal Izquierda



Nota. En la figura se muestra el límite de deflexión admisible WINDEPAV, donde la deflexión máxima viga Benkelman sobrepasa en 04 progresivas.

Resultados de deflexiones viga Belkelman y comparativa de deflexiones con Software WINDEPAV

Tabla 14

Comparativa entre Deflexión viga Benkelman y Deflexión Admisible WINDEPAV.

DESCRIPCIÓN	TRAMO	PROGRESIVA		DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)		VERIFICACIÓN	
		(km)		V.BENKELMAN	WINDEPAV		
		INICIO	FIN				
Vía Principal Derecha	A1	0+000	2+800	13	23	23 > 13	OK
	B1	2+800	5+190	15	23	23 > 15	OK
Vía Principal Izquierda	A1	0+000	2+800	11	23	23 > 11	OK
	B1	2+800	5+190	15	23	23 > 15	OK

Nota. En la tabla se muestra la validación del ensayo de deflexiones con % que superan el 95%.

Asimismo, se presentan resultados con el Método WINDEPAV, de los cuales más del 95% de ensayos de las deflexiones, cumplen con la exigencia de las deflexiones admisibles.

Tabla 15

Validación de ensayos por Deflexión Admisible – Método WINDEPAV

Descripción	Tramo	Progresiva		Cantidad de ensayos	Deflexión WINDEPAV (10 ⁻² mm)					Confiabilidad mayor a 95 %
		Inicio	Fin		Umbral Da	<Da	<Da	>Da	>Da	
Vía Principal Derecha	A1	0+00	2+800	103	23	103	100%	0	0.00%	OK
	B1	2+800	5+190	95	23	94	98.90%	1	1.10%	OK
Vía Principal Izquierda	A1	0+00	2+800	104	23	104	100%	0	0.00%	OK
	B1	2+800	5+190	97	23	93	95.90%	4	4.10%	OK

Nota. En la tabla se muestra la validación del ensayo de deflexiones con % que superan el 95%.

En base a estos resultados se presentan los deflectogramas que determinan el comportamiento estructural de pavimentos, mediante el método WINDEPAV, tanto para la vía principal derecha e izquierda

Resultados de parámetros estructurales por normativa peruana (CONREVIAl) y comparativa de deflexiones viga Benkelman

Estos resultados demuestran que, al comparar las deflexiones características con las deflexiones admisibles, se puede observar que todos los de las deflexiones características se encuentran por debajo de las deflexiones admisibles, para ello se toma como umbrales las deflexiones admisibles.

En base a ello, se tiene para la determinación de parámetros estructurales por normativa peruana CONREVIAl, se tiene los resultados tanto para la vía principal derecha, como la vía principal izquierda.

Tabla 16

Comparativa entre Deflexión Característica y Deflexión Admisible (CONREVIAl)

DESCRIPCIÓN	TRAMO	PROGRESIVA (km)		ESAL (10 ⁶)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)		DEFL. CARACT. (10 ⁻² mm)			VERIFICACIÓN	
		INICIO	FIN		ADMISIBLE	CRÍTICA	DVB PROM	DESV EST	D _{caract}		
Vía Principal Derecha	A1	0+000	2+800	66.7	36	51	13	3.3	18	36 > 18	OK
Vía Principal Izquierda	B1	2+800	5+190	47.1	40	55	15	3.5	21	40 > 21	OK

Nota. En la tabla se muestra la validación del ensayo de deflexiones con % que superan el 95%.

Finalmente, los valores obtenidos por el método CONREVIAl, se determinan, en base a la validación de los resultados de las deflexiones, de los tramos en evaluación (A1 y B1), tanto para la Vía Principal Derecha, como para la Vía Principal Izquierda. La validación está referida al 95% de nivel de confianza. Estos valores se presentan en el cuadro.

Tabla 17*Validación de ensayos por Deflexión Admisible – Método CONREVIAl*

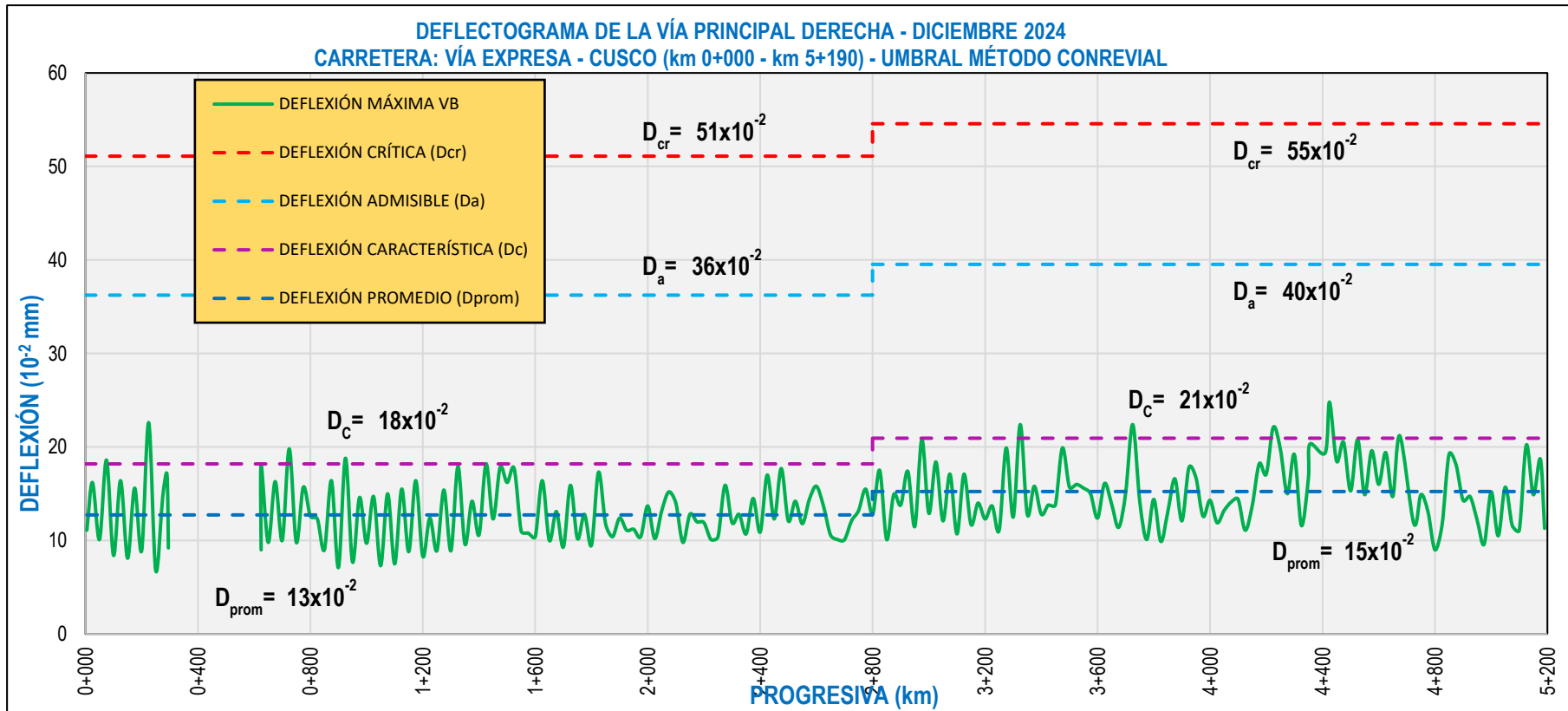
Descripción	Tramo	Progresiva		Cantidad de ensayos	Deflexión CONREVIAl (10-2mm)					Confiabilidad mayor a 95 %
		Inicio	Fin		Umbral	Da	<Da	<Da	>Da	
Vía Principal Derecha	A1	0+00	2+800	103	36	103	100%	0	0.00%	OK
	B1	2+800	5+190	95	40	95	100%	0	0.00%	OK
Vía Principal Izquierda	A1	0+00	2+800	104	36	104	100%	0	0.00%	OK
	B1	2+800	5+190	97	40	97	100%	0	0.00%	OK

Nota. En la tabla se muestra la validación del ensayo de deflexiones con % que superan el 95%.

En base a estos resultados se presentan los deflectogramas que determinan el comportamiento estructural de pavimentos, mediante el método CONREVIAl, tanto para la vía principal derecha e izquierda.

Figura 20

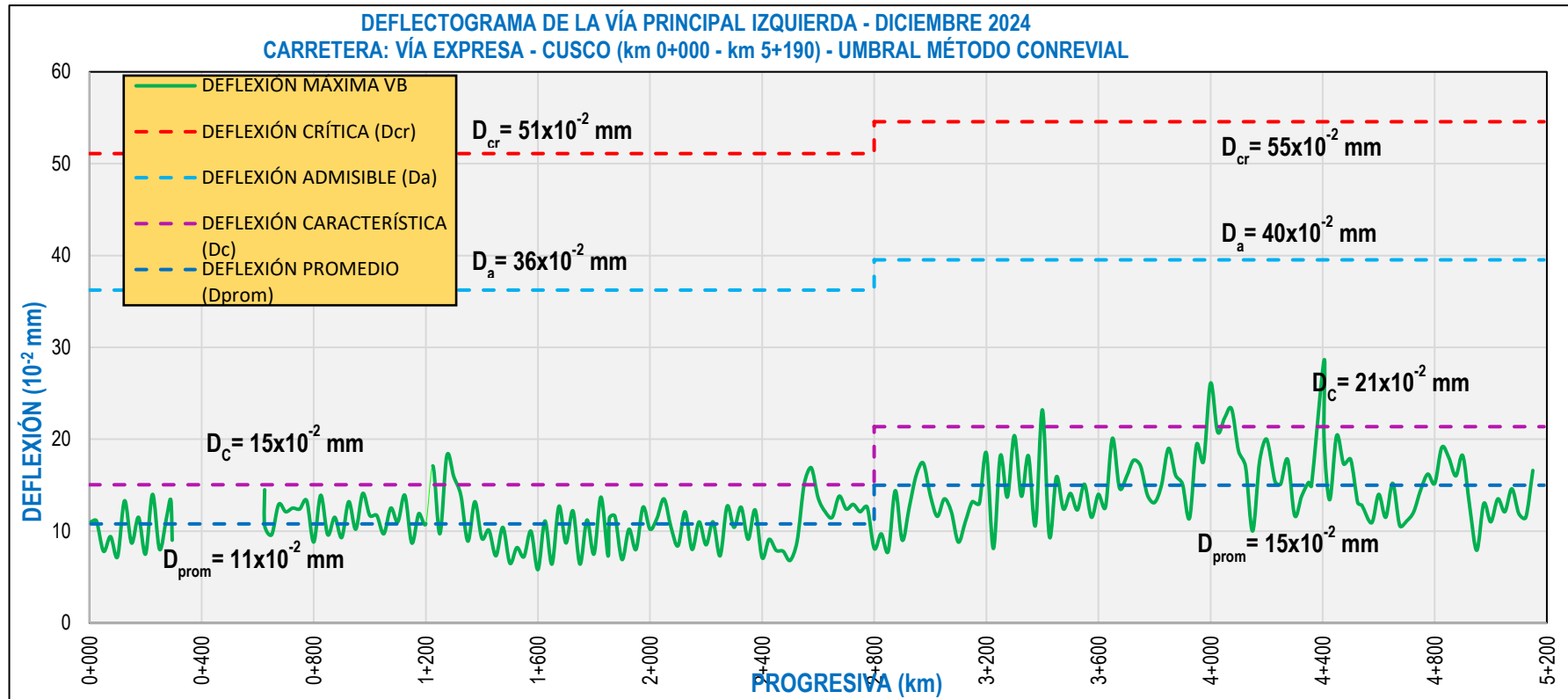
Deflectograma de la Vía Principal Derecha – Umbral Método CONREVIAL



Nota. En la figura se muestra los límites de deflexión máxima que ningún punto supera la deflexión admisible.

Figura 21

Deflectograma de la Vía Principal Izquierda – Umbral Método CONREVIAL



Nota. En la figura se muestra los límites de deflexión máxima que ningún punto supera la deflexión admisible.

5.2 Discusión

Los promedios de deflexiones del pavimento convertidas a viga Benkelman en la vía expresa Cusco es ($13-15 \times 10^{-2}$ mm) y ($11-15 \times 10^{-2}$ mm) resultaron menores que el umbral del proyecto 23×10^{-2} mm (WINDEPAV) en los tramos (A1, B1) y calzadas; además las deflexiones características (18×10^{-2} mm en A1; 21×10^{-2} mm en B1) son menores que las deflexiones admisibles $36-40 \times 10^{-2}$ mm (CONREVIAL), por lo que el comportamiento de la vía expresa Cusco es mejor (más conservador) que los límites de aceptación operacional y normativa. Esta consistencia coincide con el antecedente de Julca (2022), en la Carretera Central las deflexiones resultaron, calzada derecha $D_o=133\mu\text{m}$ y la calzada izquierda $D_o=202.29\mu\text{m}$, y en mi investigación obtuve D_o prom derecha= $236\mu\text{m}$ y D_o prom izquierda= $218\mu\text{m}$.

Los parámetros retrocalculados en la vía expresa Cusco ($M_r \approx 171$ MPa; $E_{pav} \approx 804$ MPa; $S_{Neff} \approx 5.94$) son mayores que los parámetros de diseño del proyecto (M_r 120 MPa; E_{pav} 695 MPa; S_{Neff} 5.69), lo que implica rigidez suficiente y capacidad residual. Esta relación “módulo de campo \geq mínimos de diseño” es coherente con el enfoque de Julca (2022) que privilegia el cuenco FWD como descriptor estable de capacidad, y con la línea metodológica que traduce cuencos a parámetros de diseño, por lo que la vía expresa presenta un patrón similar al reportado con este antecedente.

La comparación operativa mostró que todos los promedios por tramo/calzadas en la vía expresa Cusco ($11-15 \times 10^{-2}$ mm) son menores que el umbral del proyecto 23×10^{-2} mm (WINDEPAV) y que cumplen con las verificaciones por tramo; los pocos máximos ($25-29 \times 10^{-2}$ mm) son mayores que el promedio pero menores o puntualmente cercanos al umbral, quedando como casos aislados a vigilar. Este patrón de concordancia entre deflexión FWD convertido a viga Benkelman y umbral del proyecto es similar a la evidencia metodológica donde distintas técnicas deflectométricas pueden correlacionarse

con buena proximidad; por ejemplo, Farfán (2022) obtuvo una relación LWD/FWD \approx 0.90–1.15, lo que respalda la equivalencia operativa cuando se mantiene la trazabilidad de correcciones y malla de ensayo.

Las deflexiones características de la vía expresa Cusco (18 y 21×10^{-2} mm) resultan menores que las deflexiones admisibles 36 y 40×10^{-2} mm (CONREVIAl) con grado de confiabilidad $> 95\%$ y 100% de ensayos $< Da$ por tramo; ello es similar a los criterios de aceptación observados en antecedentes nacionales, se recomienda conservación preventiva antes que refuerzos. En suma, frente a la normativa peruana y al contraste operacional con viga Benkelman, la condición de la vía expresa Cusco es mejor que el umbral (margen de seguridad) y coincide con el estándar técnico descrito en los antecedentes citados.

VI. Conclusiones

Del objetivo general. Se determinó que en la vía expresa las deflexiones arrojaron grado de confiabilidad mayores al 95% en su totalidad cumpliendo las deflexiones admisibles de los umbrales del proyecto definido por WINDEPAV y CONREVIAl, resultando que la condición de pavimento cumple con los estándares exigidos, y por lo tanto la condición estructural es buena para la recepción operativa.

Del objetivo específico 1. Se evaluó las características estructurales de pavimentos por retrocálculo de deflexiones FWD método AASHTO93 arrojando valores de módulo resiliente del pavimento, para la vía principal derecha es 213 MPa y 189 MPa, y la vía principal izquierda es 230 MPa y 171 MPa, los módulos resilientes se encuentran por encima del diseño del proyecto de 120 MPa. El módulo equivalente de la vía principal derecha es 910 MPa y 780 MPa y la vía principal izquierda es 1003 MPa y 804 MPa, los módulos equivalentes se encuentran por encima del diseño del proyecto de 695 MPa. También los números estructurales en la vía principal derecha es 6.19 y 5.89, y en la vía principal izquierda es 6.40 y 5.94, los números estructurales se encuentran por encima del diseño del proyecto de 5.69, validando la rigidez del paquete estructural y la consistencia de las mediciones para el retrocálculo de módulos y número estructural efectivo.

Del objetivo específico 2. Se evaluó los parámetros estructurales de pavimentos según las deflexiones FWD – viga Benkelman promedio es $(13-15 \times 10^{-2} \text{ mm})$ y $(11-15 \times 10^{-2} \text{ mm})$ resultaron menores que el umbral del proyecto $23 \times 10^{-2} \text{ mm}$ (WINDEPAV), se evidenció que la vía principal derecha 01 punto supera el umbral del proyecto representando el 98.90% del grado de confiabilidad y la vía principal izquierda 04 puntos supera el umbral del proyecto representando el 95.90% del grado de confiabilidad de los

puntos, pero ambas vías superan el grado de confiabilidad mínima del 95% confirmando que la vía cumple con los umbrales definidos para la recepción operativa.

Del objetivo específico 3. Se evaluó los parámetros estructurales de pavimentos por normativa peruana (CONREVIAl) y comparativa con viga Benkelman confirmó el cumplimiento normativo: las deflexiones características promedio de la vía principal derecha de 18×10^{-2} mm y 21×10^{-2} mm y la vía principal izquierda de 15×10^{-2} mm y 21×10^{-2} mm resultaron menores a la deflexión admisible de 36×10^{-2} mm y 40×10^{-2} mm respectivamente, y que todas las mediciones de deflexiones pasan al 100%, ambas calzadas superan el grado de confiabilidad mínima de 95%, por lo tanto la capacidad estructural es suficiente.

VII. Recomendaciones

Al objetivo general. Si bien los resultados obtenidos en la evaluación estructural por deflexiones muestran que tanto la vía principal derecha como la izquierda cumplen con los parámetros técnicos establecidos por WINDEPAV y CONREVIAl, se recomienda implementar un programa de monitoreo periódico mediante FWD con el fin de detectar oportunamente variaciones en los niveles de deflexión, especialmente en los sectores donde se han registrado valores máximos cercanos o ligeramente superiores al límite admisible. Asimismo, sería conveniente reforzar las acciones de mantenimiento preventivo y la corrección de drenajes superficiales y subterráneos, ya que estas medidas contribuyen a conservar la uniformidad estructural y evitar el deterioro prematuro del pavimento. Finalmente, para garantizar la prolongada vida útil proyectada de la vía, se sugiere complementar el análisis con estudios de tránsito actualizado y proyecciones de crecimiento vehicular, de modo que la gestión de la infraestructura esté alineada con las condiciones reales de la demanda.

Al objetivo específico 1. Considerando que la totalidad de los ensayos de deflexiones se encuentran por debajo del umbral admisible (23×10^{-2} mm) y que la confiabilidad estadística es superior al 95 %, se recomienda establecer un plan de conservación rutinaria y preventiva que asegure la prolongación de la vida útil del pavimento. Dicho plan debe incluir acciones como: sellado de fisuras incipientes, control del drenaje superficial y subterráneo, y monitoreo periódico mediante nuevas mediciones de FWD para verificar la evolución de las deflexiones en el tiempo. Asimismo, dado que los resultados son altamente favorables, se sugiere utilizar esta información como línea base de referencia para futuros estudios comparativos, de manera que se pueda evaluar el impacto del tránsito proyectado al 2025 y adoptar medidas correctivas en caso de que las condiciones de carga superen lo previsto.

Al objetivo específico 2. Se recomienda implementar en la normativa peruana la metodología de windepav y metodologías modernas de gestión de pavimentos, ya que sus parámetros son más rigurosos y óptimos para obtener una mejor calidad de pavimento estructural.

Al objetivo específico 3. Se recomienda la revisión y actualización periódica de parámetros clave, como la deflexión admisible, deflexión crítica y deflexión característica de la normativa peruana CONREVIAl.

Se recomienda realizar mediciones con deflectómetro de impacto (FWD) en la región de Apurímac ya que son ensayos no destructivos y las mediciones son rápidas y exactas en comparación con viga Benkelman.

VIII. Referencias

- AASHTO. (1993). *Guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Al-Qadi, I. L. y Elseifi, M. A. (2007). Backcalculation of pavement layer properties. In T. Scullion (Ed.), *Nondestructive testing of pavements and backcalculation of moduli* (Vol. 2, pp. 123-150). ASTM International.
- Araujo, M. A., Santos, M. J. P. dos, Pinheiro, H. P. y Cruz, Z. V. (2016, noviembre 19). *Análisis comparativo de los métodos de suelo pavimento duro (hormigón) x flexible (asfalto)*. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/ingenieria-civil/metodos-de-pavimentacao-2>
- Arias Gonzáles, J. L. y Covinos Gallardo, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación* (1.^a ed. digital). Enfoques Consulting EIRL. https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf
- ASTM International. (2020). *Standard test method for deflections with a falling-weight-type impulse load device (ASTM D4694-09(2020))*. <https://www.astm.org/d4694-09r20.html>
- Bastola, N. R., Souliman, M. I., Dessouky, S. y Daoud, R. (2022). Structural health assessment of pavement sections in the southern central United States using FWD parameters. *Frontiers in Built Environment*, 8, 1026469. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1026469>
- Contraloría General de la República del Perú. (2024). *Contraloría detecta deficiencias en obra de la Vía Expresa*. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/institucion/contraloria/noticias/1012185-contraloria-detecta-deficiencias-en-obra-de-la-via-expresa>

- Contraloría General de la República. (2023). *Deficiencias detectadas en obra vial de Cusco pone en riesgo su continuidad*.
<https://www.gob.pe/institucion/contraloria/noticias/851800-deficiencias-detectadas-en-obra-vial-de-cusco-pone-en-riesgo-su-continuidad>
- Contraloría General de la República. (2024). *Contraloría detecta deficiencias en obra de la Vía Expresa (Cusco)*. <https://www.gob.pe/institucion/contraloria/noticias/1012185-contraloria-detecta-deficiencias-en-obra-de-la-via-expresa>
- Delgado, M., y Vargas, L. (2021). *Diseño y análisis de pavimentos: Enfoque mecanístico-empírico*. Ecoe.
- Díaz, Flores, R., Torres, L., Ponce, R., Muñoz, G. y Ossa, E. (2023). Multi-directional falling weight deflectometer (FWD) testing and quantification of the effective modulus of subgrade reaction for concrete roads. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(10), 2209–2224. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2021.2006651>
- Farfán Buendía, R. R. (2022). *Deflectómetro de impacto liviano y viga Benkelman para el análisis de deflexiones en pavimentos básicos con slurry seal, carretera Pisca–Pacaycasa 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/9153>
- Federal Highway Administration. (2006). *Geotechnical aspects of pavements: Reference manual* (Publication No. FHWA-NHI-05-037). National Highway Institute. <https://highways.dot.gov/sites/fhwa.dot.gov/files/FHWA-NHI-05-037.pdf>
- Federal Highway Administration. (2007). *Falling weight deflectometer—LTPP field operations guidelines*. <https://highways.dot.gov/media/6001>

- Federal Highway Administration. (2013). *Reformulated pavement remaining service life framework* (Report No. FHWA-HRT-13-038).
https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/26938/dot_26938_DS1.pdf
- Federal Highway Administration. (2016). *Using FWD data with M-E design and analysis* (FHWA-HRT-16-011).
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/16011/16011.pdf>
- Federal Highway Administration. (2017). *Using falling weight deflectometer data with mechanistic-empirical design and analysis, Volume II: Case study reports* (FHWA-HRT-16-010). U.S. Department of Transportation.
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/16010/16010.pdf>
- González, R., Méndez, L. y Cruz, E. (2020). *Introducción a la ingeniería de pavimentos*. Universidad de los Andes.
- Hernández, R. & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Evaluación estructural no destructiva en pavimentos* (s. f.). Hotmart. Recuperado el 29 de diciembre de 2025, de <https://hotmart.com/es/marketplace/productos/evaluacion-estructural-no-destructiva-en-pavimentos/V97179068E>
- Horak, E. (2008). Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 50(2), 2–9. https://www.saice.org.za/downloads/journal/vol50-2-2008/vol50_n2_a.pdf
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1555821>

- Ingeniería Civil. (2018). *Procedimiento de diseño de pavimento flexible*. <https://www.ingecivil.net/2018/01/17/procedimiento-de-diseno-de-pavimento-flexible/>
- American Institute of Steel Construction. (2017). *Steel construction manual* (15th ed.). AISC. <https://www.aisc.org/publications/steel-construction-manual-resources/15th-ed-steel-construction-manual/>
- International Compliance Association. (2021). *The future of compliance*. ICA Whitepaper. <https://www.int-comp.org/insight/the-future-of-compliance/>
- Jiménez, F. y Londoño, R. (2015). *Diseño de pavimentos: teoría y práctica*. Editorial Ingeniería Civil.
- Julca Vásquez, C. A. (2022). *Deflectometría de impacto en la evaluación estructural, Carretera Central km 12+250 – km 26+500, Lima 2020* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio UNFV. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/6601>
- Lohr, S. L. (2021). *Sampling: Design and Analysis* (3rd ed.). Chapman & Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429298899>
- López, M. y Sánchez, J. (2016). *Gestión del mantenimiento vial*. Universidad Nacional de Colombia.
- Main Roads Western Australia. (2020). *Engineering Road Note 16: Pavement evaluation and treatment design*. Main Roads Western Australia. <https://www.mainroads.wa.gov.au/globalassets/technical-commercial/technical-library/materials-engineering/publications/engineering-road-notes/engineering-road-note-16-pavement-evaluation-and-treatment-design.pdf>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2014). *Manual de carreteras: sección suelos, geología, geotecnia y pavimentos* (RD N.º 10-2014-MTC/14).

https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/mtc%20normas/arch_pdf/man_7%20sggp-2014.pdf

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción (EG-2013)*.
<https://www.sutran.gob.pe/wp-content/uploads/2015/08/manualdecarreterasespecificacionestecnicasgeneralesparaconstruccion.pdf>

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2010). *Norma técnica de edificación CE.010: Pavimentos urbanos* (Reglamento Nacional de Edificaciones).
https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Pavimentos_Urbanos.pdf

Neville, A. M. (2013). *Tecnología del concreto* (5.^a ed.). Pearson Educación.

NIST/SEMATECH. (n.d.). *What are confidence intervals?* In *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*. National Institute of Standards and Technology.
<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section1/prc14.htm>

Ocmin Huarsocca, A. P., y Ramos Castillo, C. R. E. (2019). *Deflectometría de impacto para la determinación del refuerzo en la carretera Lima–Chosica km 35+535 al km 39+500* [Tesis de licenciatura, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio URP.
<https://repositorio.urp.edu.pe/entities/publication/c1a454ca-1cd4-4bd8-b314-15d8be3bd158>

Ortiz, H. (2017). *Introducción a los pavimentos de carreteras*. Editorial Alfaomega.

Pierce, L. M., Bruinsma, J. E., Smith, K. D., Wade, M. J., Chatti, K., & Vandenbossche, J. M. (2017). *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic–Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis, and Interpretation* (FHWA-HRT-16-011). Federal Highway Administration.

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/16011/16011.pdf>

Rivera, J., Alderete, N., Brizuela, L. y Villanueva, M. (2014). Diseño de pavimentos urbanos por retrocálculo según Guía AASHTO 93 mediante la utilización del deflectómetro liviano de impacto. *Infraestructura Vial*, 16(27), 4–14.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5051931>

Rodríguez, D. y Pérez, L. (2018). *Tecnología de materiales para pavimentos*. Ediciones Técnicas.

Rovem Partner. (s. f.). *Medición de la deformación del suelo*.

<https://rovempartner.com/es/deflexion-de-los-pavimentos>

Sarkar, S., Biswas, S. K. y Chakraborty, S. (2024). Deflection and elastic modulus assessment of subgrade in flexible pavement mixed with waste tire scrap material. *Engineering, Technology y Applied Science Research*, 14(2), 13208–13215.

<https://www.etasr.com/index.php/ETASR/article/view/6858>

Strategic Highway Research Program. (1993). *Manual for FWD testing in the long-term pavement performance program* (SHRP-P-661). National Research Council.

<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/shrp/SHRP-P-661.pdf>

Transport, S. (2023). *Light Weight Deflectometer (LWD) correlation trial 2022* (Report 70061041-101). [https://www.transport.gov.scot/media/53070/light-weight-](https://www.transport.gov.scot/media/53070/light-weight-deflectometer-correlation-trial-report-2022.pdf)

[deflectometer-correlation-trial-report-2022.pdf](https://www.transport.gov.scot/media/53070/light-weight-deflectometer-correlation-trial-report-2022.pdf)

Triviño Molina, R. X. y Moll Martínez, R. (2022). *Evaluación deflectométrica en pavimentos flexibles mediante la viga Benkelman para las condiciones de Manabí*. *Dominio de las Ciencias*, 8(3, esp.), 203–224. <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v8i3>

University of Cambridge. (n.d.). *Definition of Young's modulus*. DoITPoMS. Retrieved December 25, 2025, from <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/thermal-expansion/young-mod-def.php>

Vankar, V., Zala D., Patel, P. y Amin, A. (2022). Structural Evaluation of Flexible Pavement Using Falling Weight Deflectometer. *International Journal of Research in Engineering and Science*, 10(9), 1–7. <https://www.ijres.org/papers/Volume-10/Issue-9/10090107.pdf>

Wang, W., Ma, T., Song, S. y Yang, K. (2024). Study on dynamic modulus prediction model of in-service asphalt pavement. *Buildings*, 14(8), 2550. <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/8/2550>

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes.