

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO POR
DEFLECTOMETRÍA E ÍNDICE DE RUGOSIDAD
INTERNACIONAL DE LA CARRETERA: PUNO –
VILQUE – MAÑAZO - 4KM CRÍTICOS - 2015”**

TESIS

PRESENTADA POR

WILDER RAMOS VILCA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO CIVIL

PROMOCIÓN 2013

**PUNO – PERÚ
2017**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**“EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO POR
 DEFLECTOMETRÍA E ÍNDICE DE RUGOSIDAD
 INTERNACIONAL DE LA CARRETERA: PUNO – VILQUE –
 MAÑAZO - 4KM CRÍTICOS - 2015”**

TESIS PRESENTADA POR:
BACH. WILDER RAMOS VILCA

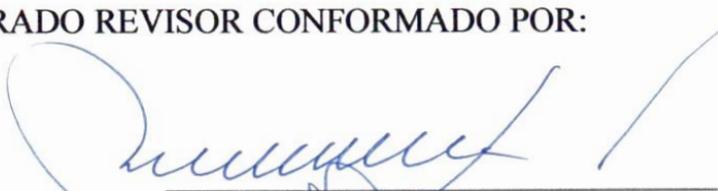


PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE:



 ING. NICOLAS LUZA FLORES

PRIMER MIEMBRO:



 ING. JOSÉ LUIS CUTIPA ARAPA

SEGUNDO MIEMBRO:



 ING. YASMANI TEÓFILO VITULAS QUILLE

DIRECTOR DE TESIS:



 ING. GINO FRANK LAQUE CÓRDOVA

ASESOR DE TESIS:



 ING. DIEL RAMOS MAMANI

Área: TRANSPORTES.

Tema: EVALUACIÓN DE PAVIMENTO.

Línea de Investigación: EVALUACIÓN DE PAVIMENTO EN EL ALTIPLANO DE PUNO.

DEDICATORIA

A DIOS,
por iluminarme y permitirme
culminar, con éxito mis estudios.

A MIS PADRES:
Mario e Isidora, por su inmenso
cariño e invaluable amor, sacrificio y apoyo
incondicional en mis estudios profesionales.

A MIS HERMANOS:
Julio Cesar, y Jemson, por sus nobles
deseos y apoyo incondicional.

A MI ESPOSA E HIJO:
Flor de María y Kenneth, por el apoyo y ánimo
que me brindan día a día para alcanzar nuevas metas
profesionales y personales.

AGRADECIMIENTO

A Mi Alma Mater, la Universidad Nacional del Altiplano,
Escuela Profesional de Ingeniería Civil.

A Los miembros de Jurado Calificador, por sus
acertadas sugerencias y/o recomendaciones.

A Mis compañeros de estudio, por su amistad durante
los cinco años de estudio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE TABLAS.....	IV
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE FÓRMULAS.....	VII
I. RESUMEN.....	- 12 -
II. ABSTRACT.....	- 13 -
III. INTRODUCCIÓN.....	- 14 -
CAPÍTULO I.....	- 15 -
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	- 15 -
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	- 15 -
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	- 15 -
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	- 16 -
1.4 ANTECEDENTES.....	- 17 -
1.5 OBJETIVOS.....	- 20 -
1.5.1 GENERAL.....	- 20 -
1.5.2 ESPECÍFICOS.....	- 20 -
1.6 HIPÓTESIS.....	- 20 -
1.6.1 HIPÓTESIS GENERAL.....	- 20 -
1.6.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICA.....	- 20 -
1.7 VARIABLES E INDICADORES.....	- 21 -
1.7.1 VARIABLE DEPENDIENTE.....	- 21 -
1.7.2 VARIABLE INDEPENDIENTE.....	- 21 -
1.8 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	- 21 -
CAPÍTULO II.....	- 26 -
MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	- 26 -
2.1 MARCO TEÓRICO.....	- 26 -
2.1.1 PAVIMENTO.....	- 26 -
2.1.2 CARACTERÍSTICAS QUE DEBE REUNIR UN PAVIMENTO.....	- 26 -
2.1.3 PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	- 27 -
2.1.3.1 RESPUESTAS Y COMPORTAMIENTO.....	- 27 -
2.1.4 TIPOS DE PAVIMENTOS.....	- 27 -
2.1.4.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	- 27 -
2.1.4.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	- 27 -
2.1.4.3 PAVIMENTO AFIRMADO.....	- 28 -
2.1.5 DEFLECTOMETRÍA.....	- 28 -
2.1.5.1 GENERALIDADES.....	- 28 -
2.1.5.2 MODELO DE HOGG.....	- 28 -
2.1.5.2.1 CARACTERÍSTICAS Y UTILIZACIÓN DEL MODELO.....	- 28 -
2.1.5.3 EQUIPO REQUERIDO.....	- 31 -
2.1.5.4 PROCEDIMIENTO EN EL CAMPO.....	- 32 -

2.1.5.5	CÁLCULO DE LAS DEFLEXIONES	- 36 -
2.1.5.5.1	DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA	- 36 -
2.1.5.6	RADIO DE CURVATURA	- 36 -
2.1.5.6.1	ANÁLISIS DE LOS RADIOS DE CURVATURA	- 37 -
2.1.5.7	MÉTODO DE ANÁLISIS	- 38 -
2.1.5.7.1	MODELO DE CARGA	- 38 -
2.1.5.7.2	DETERMINACIÓN DE R5	- 39 -
2.1.5.7.3	DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD ELÁSTICA (L0)	- 40 -
2.1.5.7.4	DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA SUBRASANTE (E0)	- 40 -
2.1.5.7.5	DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (E*)	- 41 -
2.1.5.8	PARÁMETROS DE EVALUACIÓN	- 42 -
2.1.5.8.1	SIGNIFICADO DE L0	- 43 -
2.1.5.8.2	SIGNIFICADO DE E0 Y SU RELACIÓN CON EL CBR	- 44 -
2.1.5.8.3	SIGNIFICADO DE E* Y HC	- 45 -
2.1.6	REGULARIDAD	- 46 -
2.1.6.1	ANTECEDENTES	- 47 -
2.1.7	MODELOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA REGULARIDAD (RUGOSIDAD):	- 48 -
2.1.8	EL RUGOSÍMETRO MERLIN	- 48 -
2.1.8.1	ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL	- 50 -
2.1.8.2	ESCALA DE REGULARIDAD	- 53 -
2.1.8.3	CAUSAS DE LA REGULARIDAD	- 54 -
2.1.9	METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE DETERIOROS EN PAVIMENTOS	- 56 -
2.1.9.1	ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO (PCI)	- 56 -
2.1.9.2	PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DEL PCI	- 58 -
2.1.9.2.1	PASO 1	- 60 -
2.1.9.2.2	PASO 2	- 60 -
2.1.9.2.3	PASO 3	- 63 -
2.1.9.2.4	PASO 4	- 66 -
2.1.9.2.5	PASO 5	- 66 -
2.1.9.2.6	PASO 6	- 66 -
2.3	MARCO CONCEPTUAL	- 68 -
2.4	GLOSARIO	- 69 -
CAPÍTULO III		- 70 -
PROCEDIMIENTOS PARA LA EJECUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN		- 70 -
3.	PROCEDIMIENTOS PARA LA EJECUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	- 70 -
3.1	EVALUACIÓN DE LA VÍA	- 70 -
3.1.1	TRABAJO DE CAMPO	- 70 -
3.1.2	INSPECCIÓN VISUAL	- 70 -
3.1.3	ENSAYOS EN LA VÍA	- 72 -
3.1.2.1	EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO MEDIANTE EL MÉTODO DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO (PCI)	- 72 -
3.1.2.1.1	DIVISIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTRA:	- 73 -
3.1.2.1.2	SELECCIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO PARA INSPECCIÓN:	- 75 -
3.1.2.1.3	DETERMINACIÓN DEL PCI EN LAS SECCIONES EN ESTUDIO	- 76 -
3.1.2.1.4	CÁLCULO DE LOS VALORES DEDUCIDOS	- 76 -
3.1.2.1.5	CÁLCULO DEL PCI DE LA UNIDAD DE MUESTRA	- 81 -
3.1.2.2	DEFLEXIÓN Y DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EMPLEANDO LA VIGA BENKELMAN – PROCEDIMIENTO	- 83 -
3.1.2.2.1	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA	- 86 -
3.1.2.3	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EMPLEANDO EL RUGOSÍMETRO MERLIN – PROCEDIMIENTO	- 92 -

3.1.2.3.1	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DEL IRI	- 94 -
CAPÍTULO IV	- 98 -
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	- 98 -
4.1	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN POR EL MÉTODO DE ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO (PCI)	- 98 -
4.1.1	DATOS RECOLECTADOS PARA LA OBTENCIÓN DEL PCI	- 98 -
4.1.2	RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO PCI	- 98 -
4.2	RESULTADOS DEL ESTUDIO DE TRÁFICO	- 101 -
4.2.1	EVALUACIÓN DEL TRÁNSITO EXISTENTE	- 101 -
4.2.2	CÁLCULO DEL ÍNDICE MEDIO DIARIO	- 102 -
4.2.3	RESULTADOS OBTENIDOS	- 102 -
4.2.4	CLASIFICACIÓN VEHICULAR PROMEDIO	- 102 -
4.2.5	FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA, FEC.....	- 103 -
4.2.6	CÁLCULO DEL FACTOR CAMIÓN, FC	- 104 -
4.2.7	CÁLCULO DE EJES EQUIVALENTES	- 106 -
4.2.8	DEFLEXIONES ADMISIBLES.....	- 107 -
4.3	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA DEFLEXIÓN Y DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA, EMPLEANDO LA VIGA BENKELMAN	- 107 -
4.3.1	ENSAYOS REALIZADOS CON LA VIGA BENKELMAN	- 107 -
4.3.2	RESUMEN DEFLECTOMÉTRICO DE LOS RESULTADOS	- 116 -
4.4	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN POR EL MÉTODO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL IRI	- 118 -
4.4.1	ENSAYOS REALIZADOS CON EL RUGOSÍMETRO MERLIN	- 118 -
4.4.2	RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE REGULARIDAD	- 139 -
4.5	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL MATERIAL DE BASE MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO	- 140 -
4.5.1	ENSAYOS REALIZADOS AL MATERIAL DE BASE GRANULAR	- 140 -
4.5.2	RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE EVALUACIÓN DEL MATERIAL DE BASE MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO	- 140 -
4.6	CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS	- 144 -
	CONCLUSIONES	- 146 -
	RECOMENDACIONES	- 147 -
	BIBLIOGRAFÍA	- 148 -
	ANEXOS	- 150 -

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CUADRO DE RESUMEN DE TIPO Y CANTIDAD DE ENSAYOS A REALIZAR.	- 21 -
TABLA 2: CUADRO DE EXTRACCIÓN DE MUESTRAS INSITU.	- 22 -
TABLA 3: UBICACIÓN MEDIANTE COORDENADAS DE LA VÍA EN EVALUACIÓN.	- 22 -
TABLA 4: UBICACIÓN DE LOS CUATRO (04) KM MÁS CRÍTICOS.....	- 24 -
TABLA 5: UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE MUESTRAS INSITU.....	- 25 -
TABLA 6: HOJA DE CÁLCULO PARA LA RECOPIACIÓN DE DEFLEXIONES.	- 35 -
TABLA 7: DEFLEXIONES CARACTERÍSTICAS SEGÚN EL TIPO DE CARRETERA.	- 36 -
TABLA 8: COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PARA EL CÁLCULO DE R5 EN EL MODELO DE HOGG.	- 39 -
TABLA 9: COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LO EN EL MODELO DE HOGG.	- 40 -
TABLA 10: COMPARACIÓN DE VALORES IRI UTILIZADOS EN OTROS PAÍSES.	- 53 -
TABLA 11: RUGOSIDAD INICIAL IRI (M/KM) SEGÚN TIPO DE CARRETERA CON CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE.	- 54 -
TABLA 12: LONGITUDES DE UNIDADES DE MUESTREO ASFÁLTICAS (EJEMPLO).....	- 57 -
TABLA 13: FALLAS CONSIDERADAS.	- 59 -
TABLA 14: RESUMEN DE VALORES DEL EJEMPLO.	- 63 -
TABLA 15: VALORES DE DEDUCCIÓN DEL EJEMPLO.....	- 65 -
TABLA 16: VALORES DE DEDUCCIÓN TOTAL DEL EJEMPLO.	- 66 -
TABLA 17: CANTIDAD, FRECUENCIAS Y NÚMERO DE ENSAYOS.....	- 72 -
TABLA 18: SECCIONES DEL PAVIMENTO.....	- 73 -
TABLA 19: HOJA DE REGISTRO DE CAMPO DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO.	- 77 -
TABLA 20: MODELO DE LLENADO DE HOJA DE CAMPO PCI.	- 78 -
TABLA 21: USO DE ÁBACOS DE VALORES DEDUCIDOS.....	- 79 -
TABLA 22: VALOR DEDUCIDO TOTAL.....	- 80 -
TABLA 23: FORMATO LLENADO DE ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO.	- 82 -
TABLA 24: CUADRO DISTANCIA DE ENSAYO DE DEFLECTOMETRÍA.	- 83 -
TABLA 25: MEDICIONES EFECTUADAS EN CAMPO.	- 87 -
TABLA 26: DESARROLLO DE CÁLCULO DEL D0 CORREGIDO.....	- 88 -
TABLA 27: DESARROLLO DESVIACIÓN ESTÁNDAR.....	- 89 -
TABLA 28: FORMATO DE CAMPO DEL RUGOSÍMETRO MERLIN.....	- 93 -
TABLA 29: DATOS DE CAMPO CON EL RUGOSÍMETRO MERLIN.....	- 94 -
TABLA 30: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS.....	- 95 -
TABLA 31: FACTOR DE CORRECCIÓN.	- 97 -
TABLA 32: RESUMEN DE RESULTADOS PCI.....	- 98 -
TABLA 33: RESUMEN METODO PCI PROMEDIO POR SECCIONES.	- 101 -
TABLA 34: ÍNDICE MEDIO DIARIO.....	- 102 -
TABLA 35: FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA.	- 104 -
TABLA 36: TABLA DE PESOS Y MEDIDAS.....	- 105 -
TABLA 37: EJES EQUIVALENTES DE CARGA (ESAL).....	- 106 -
TABLA 38: RESUMEN DEFLECTOMÉTRICO PRIMER TRAMO CRÍTICO.	- 116 -
TABLA 39: RESUMEN DEFLECTOMÉTRICO SEGUNDO TRAMO CRÍTICO.....	- 116 -
TABLA 40: RESUMEN DEFLECTOMÉTRICO CARRIL DERECHO (4KM).....	- 116 -
TABLA 41: RESUMEN DEFLECTOMÉTRICO CARRIL IZQUIERDO (4KM).....	- 117 -
TABLA 42: RESUMEN DE REGULARIDAD PRIMER TRAMO CRÍTICO.....	- 139 -
TABLA 43: RESUMEN DE REGULARIDAD SEGUNDO TRAMO CRÍTICO.....	- 139 -
TABLA 44: RESUMEN DE REGULARIDAD (4KM) MÁS CRÍTICOS.	- 139 -
TABLA 45: RESUMEN DE ENSAYOS CALICATA – 1.	- 140 -
TABLA 46: RESUMEN DE ENSAYOS CALICATA – 2.....	- 141 -
TABLA 47: REQUERIMIENTOS GRANULOMÉTRICOS PARA BASE GRANULAR.	- 141 -
TABLA 48: REQUERIMIENTOS DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE CBR.....	- 142 -
TABLA 49: REQUERIMIENTOS AGREGADO FINO.	- 143 -

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: ESQUEMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN CON LA VIGA BENKELMAN.	- 34 -
GRÁFICO 2: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE R5.	- 39 -
GRÁFICO 3: SIGNIFICADO CUALITATIVO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CURVAS DE DEFLEXIONES.	- 44 -
GRÁFICO 4: ESQUEMA DEL RUGOSÍMETRO DE MERLIN.....	- 49 -
GRÁFICO 5: MODELO DE CUARTO DE CARRO.	- 52 -
GRÁFICO 6: ESCALA ESTÁNDAR EMPLEADA POR EL BANCO MUNDIAL PARA CUANTIFICAR EL IRI.....	- 53 -
GRÁFICO 7: PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL PCI.....	- 58 -
GRÁFICO 8: ÍNDICE PCI Y ESCALA DE GRADUACIÓN.....	- 60 -
GRÁFICO 9: FORMATO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO (PCI).....	- 61 -
GRÁFICO 10: EJEMPLO DE LLENADO DEL FORMATO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO (PCI).....	- 62 -
GRÁFICO 11: VALOR DE DEDUCCIÓN DE GRIETA DE BLOQUE.	- 64 -
GRÁFICO 12: VALOR DE DEDUCCIÓN GRIETA LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL.	- 65 -
GRÁFICO 13: VALOR DE DEDUCCIÓN CORREGIDA.	- 67 -
GRÁFICO 14: VALOR DE DEDUCCIÓN CORREGIDA (EJEMPLO).....	- 67 -
GRÁFICO 15: FALLAS DE LA VÍA EN ESTUDIO KM 39+900.	- 71 -
GRÁFICO 16: ILUSTRACIÓN DE LA UNIDAD DE MUESTRA.	- 73 -
GRÁFICO 17: REPRESENTACIÓN DE SECCIÓN 1 E INTERVALO DE UNIDADES DE MUESTRA.	- 75 -
GRÁFICO 18: EJEMPLO DEL VALOR DE DEDUCCIÓN – PIEL DE COCODRILO.	- 79 -
GRÁFICO 19: EJEMPLO DEL CÁLCULO DEL VALOR DE DEDUCCIÓN CORREGIDO.	- 81 -
GRÁFICO 20: LECTURA DE DIAL DE LA VIGA BENKELMAN.	- 85 -
GRÁFICO 21: AJUSTE DE LA VIGA BENKELMAN KM 07 + 800.	- 86 -
GRÁFICO 22: ÚLTIMA LECTURA DEL DIAL DEFORMACIÓN CERO.	- 86 -
GRÁFICO 23: PROBABILIDAD DE DISTRIBUCIÓN NORMAL – LÍMITE INFERIOR Y SUPERIOR.....	- 90 -
GRÁFICO 24: DISPERSIONES DE DEFLEXIONES.....	- 90 -
GRÁFICO 25: EQUIPO PARA EL RUGOSÍMETRO MERLIN KM 08+200.	- 92 -
GRÁFICO 26: LECTURA DEL EQUIPO KM 08+000.....	- 93 -
GRÁFICO 27: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS.	- 95 -
GRÁFICO 28: DESCARTE DE DATOS PARA EL INTERVALO 4.....	- 96 -
GRÁFICO 29: DESCARTE DE DATOS PARA EL INTERVALO 4.....	- 96 -
GRÁFICO 30: VARIACIÓN VEHICULAR DIARIA.	- 103 -
GRÁFICO 31: CLASIFICACIÓN VEHICULAR.....	- 103 -
GRÁFICO 32: EL FACTOR EQUIVALENTE DE CARGA DEL CAMIÓN C2.	- 106 -
GRÁFICO 33: CLASIFICACIÓN DEFLEXIÓN VS DISTANCIA DE MEDICIÓN CARRIL DERECHO (4KM).....	- 116 -
GRÁFICO 34: DEFLEXIÓN VS DISTANCIA DE MEDICIÓN CARRIL IZQUIERDO (4KM).	- 117 -
GRÁFICO 35: CURVA GRANULOMÉTRICA C1: KM 07+500.....	- 142 -
GRÁFICO 36: CURVA GRANULOMÉTRICA C2: KM 16+400.	- 142 -

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: UBICACIÓN DE LA CARRETERA PUNO – VILQUE - MAÑAZO.	- 23 -
FIGURA 2: VISTA SATELITAL DE LA VÍA A EVALUAR.	- 24 -
FIGURA 3: UBICACIÓN DE LOS CUATRO (04) KM MÁS CRÍTICOS DEL TRAMO.	- 24 -
FIGURA 4: VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DE LAS CALICATAS C-1 Y C-2.	- 25 -
FIGURA 5: SECCIÓN TÍPICA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.	- 27 -
FIGURA 6: SECCIÓN TÍPICA DE UN PAVIMENTO RÍGIDO.	- 28 -
FIGURA 7: CURVAS DE DEFLEXIONES EN EL MODELO DE HOGG PARA LA CONFIGURACIÓN DE CARGA DE LA VIGA BENKELMAN.	- 29 -
FIGURA 8: NOMOGRAMA PARA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL BASADA EN EL MODELO DE HOGG (VIGA BENKELMAN).	- 30 -
FIGURA 9: ESQUEMA Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN.	- 31 -
FIGURA 10: CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DEL SISTEMA DE CARGA EN ENSAYOS CON LA VIGA BENKELMAN.	- 33 -
FIGURA 11: POSICIÓN INICIAL DE LA VIGA BENKELMAN.	- 84 -
FIGURA 12: POSICIÓN A 0 CM – DEFLEXIÓN MÁXIMA.	- 84 -
FIGURA 13: POSICIÓN A 25CM – D25.	- 84 -
FIGURA 14: POSICIÓN A 50CM – D50.	- 85 -
FIGURA 15: POSICIÓN A 75CM – D75.	- 85 -
FIGURA 16: POSICIÓN A 100CM – D100.	- 85 -
FIGURA 17: POSICIÓN A 200CM – D200.	- 85 -

ÍNDICE DE FÓRMULAS

FÓRMULA 1: RADIO DE CURVATURA	- 37 -
FÓRMULA 2: RADIO DE LA HUELLA CIRCULAR DE CONTACTO	- 38 -
FÓRMULA 3: R5	- 39 -
FÓRMULA 4: L0	- 40 -
FÓRMULA 5: RELACIÓN ENTRE RIGIDECES PUNTUAL Y DISTRIBUIDA	- 41 -
FÓRMULA 6: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA SUBRASANTE	- 41 -
FÓRMULA 7: ESPESOR EQUIVALENTE.....	- 42 -
FÓRMULA 8: MÓDULO DE ELASTICIDAD EQUIVALENTE.....	- 42 -
FÓRMULA 9: RELACIÓN MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA SUBRASANTE CON EL CBR.	- 45 -
FÓRMULA 10: RELACIÓN MODULAR.	- 45 -
FÓRMULA 11: RELACIÓN RIGIDEZ FLEXIONANTE DEL PAVIMENTO EVALUADO Y EL PAVIMENTO NUEVO.	- 46 -
FÓRMULA 12: CRÉDITO ESTRUCTURAL.....	- 46 -
FÓRMULA 13: CRÉDITO ESTRUCTURAL MODIFICADO.....	- 46 -
FÓRMULA 14: ESPESOR DE REFUERZO.	- 46 -
FÓRMULA 15: NÚMERO MÍNIMO DE SECCIONES A MUESTREAR.	- 57 -
FÓRMULA 16: INTERVALO DE ESPACIAMIENTO ENTRE UNIDADES A INSPECCIONAR.....	- 57 -
FÓRMULA 17: CÁLCULO DEL PCI.....	- 67 -
FÓRMULA 18: DEFLEXIONES CORREGIDAS	- 88 -
FÓRMULA 19: DEFLEXIÓN MEDIA	- 88 -
FÓRMULA 20: DESVIACIÓN ESTÁNDAR.....	- 89 -
FÓRMULA 21: COEFICIENTE DE VARIACIÓN	- 90 -
FÓRMULA 22: DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA	- 91 -
FÓRMULA 23: DEFLEXIÓN ADMISIBLE	- 91 -
FÓRMULA 24: FACTOR DE CORRECCIÓN.....	- 96 -
FÓRMULA 25: RANGO "D" CORREGIDO.....	- 97 -
FÓRMULA 26: CÁLCULO DEL IRI.....	- 97 -

I. RESUMEN

La presente investigación se realizó en la carretera Puno – Vilque – Mañazo del km 00+000 al km 39+900, ubicada en la provincia de Puno del departamento de Puno durante el año 2015, tomándose como parámetros de evaluación el índice de condición de pavimento, la deflexión admisible y el índice de regularidad internacional.

El propósito de la presente investigación “Evaluación del Estado del Pavimento por Deflectometría e Índice de Rugosidad Internacional de la Carretera: Puno – Vilque – Mañazo - 4km Críticos - 2015”, fue evaluar el estado del pavimento. Para ello fue necesario conocer la medida en que se encuentran el índice de condición de pavimento (PCI), las deflexiones características, así mismo se evaluó en qué medida varía el índice de regularidad internacional en los 4 kilómetros más críticos del pavimento. Metodológicamente la población estuvo formada por los tramos del km 06+500 al km 08+000 y km 15+400 al km 17+400, los cuales conforman los 4 kilómetros más críticos de la vía en estudio Puno – Vilque – Mañazo, en la cual se realizó los ensayos con: la Viga Benkelman, para determinar la **deflexión característica**, y el Rugosímetro Merlin para determinar el **índice de regularidad internacional**.

El desarrollo del proyecto de tesis permitió determinar el índice de condición de pavimento, la deflexión característica y el índice de regularidad internacional. Lo que permitió llegar a las siguientes conclusiones: a) Mediante el ensayo de la Viga Benkelman en el pavimento, se obtuvo los valores de deflexión característica promedio de: 69.22×10^{-2} mm en el carril derecho, de la misma manera en el carril izquierdo 65.53×10^{-2} mm, lo que nos indica que las deflexiones características no superan la deflexión admisible la cual resulto ser 127.5×10^{-2} mm, lo que nos conlleva a entender que el pavimento en ambos carriles se encuentran en buenas condiciones en lo que se refiere a los ensayos deflectométricos. b) se observó un desgaste considerable quedando evidenciado con el valor del IRI, teniendo unos valores IRI de: 4.78 m/km en el carril derecho y 4.63 m/km en el carril izquierdo; con los cuales se puede concluir que el pavimento evaluado no cumple con las especificaciones técnicas y los requerimientos que estipula el Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”. Donde nos indica que la regularidad característica no deberá ser mayor a 4.00, para carreteras de un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.

Palabras clave: Evaluación, pavimento, inspección, medición, regularidad, deflectometría, deflexión, comportamiento.

II. ABSTRACT

The present investigation was carried out on the Puno - Vilque - Mañazo road from km 00 + 000 to km 39 + 900, located in the province of Puno in the department of Puno during 2015, taking as evaluation parameters the pavement condition index , the permissible deflection and the international regularity index.

The purpose of the present investigation was to evaluate the state of the pavement by Deflectometry and International Roughness Index of the Road: Puno - Vilque - Mañazo - 4km Critics - 2015. For this, it was necessary to know the extent of the pavement condition index (PCI), the characteristic deflections, as well as the extent to which the international regularity index varies in the 4 km most critical pavement. Methodologically the population was formed by the stretches of km 06 + 500 to km 08 + 000 and km 15 + 400 to km 17 + 400, which make up the 4 most critical kilometers of the Puno - Vilque - Mañazo road in the which were tested with: the Benkelman Beam, to determine **the characteristic deflection**, and the Merlin Roughness Meter to determine **the international regularity index**.

The development of the thesis project made it possible to determine the pavement condition index, the characteristic deflection and the international regularity index. This led to the following conclusions: a) The Benkelman Beam test on the pavement gave the average characteristic deflection values of: 69.22×10^{-2} mm in the right lane, in the same way in the lane Left 65.53×10^{-2} mm, which indicates that the characteristic deflections do not exceed the permissible deflection which turned out to be 127.5×10^{-2} mm, which means we understand that the pavement in both lanes are in good condition in which refers to the deflectometric tests. b) considerable wear was observed with the IRI value, having IRI values of: 4.78 m/km in the right lane and 4.63 m/km in the left lane; with which it can be concluded that the pavement evaluated does not comply with the technical specifications and the requirements stipulated in the Manual of Roads "Soils, Geology, Geotechnics and Pavements". Where it indicates that the characteristic regularity should not be greater than 4.00, for an IMDA road between 2000-401 veh/day, of a road of two lanes.

Keywords: Evaluation, pavement, inspection, measurement, regularity, deflectometry, deflection, behavior.

III. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se centró en las evaluaciones del pavimento, mediante el índice de condición de pavimento, deflectometría y regularidad, para así poder conocer el estado en el que se encuentra la carretera Puno – Vilque – Mañazo km 00+000 al km 39+900.

En este sentido, la investigación destacará cuatro puntos importantes. Por un lado, la evaluación por el método del índice de condición de pavimento (PCI) con la cual se definirán los 4 kilómetros más críticos de la carretera: Puno – Vilque - Mañazo, una vez definidos los 4 kilómetros críticos se realizarán sobre estos, las pruebas deflectométricas con la Viga Benkelman, ensayos de regularidad con el Rugosímetro Merlin, y finalmente extracción de muestras insitu para su análisis en el laboratorio de suelos y pavimentos.

Este proyecto de tesis está organizado en los siguientes capítulos:

- I Problema de la investigación que desarrolla el planteamiento del problema, caracterizándolo para posteriormente establecer la justificación del mismo, los antecedentes, los objetivos del estudio, que han sido el marco referencial para el desarrollo del presente proyecto de investigación.
- II Marco teórico y conceptual que desarrolla las fuentes teóricas que dan soporte a los planteamientos del proyecto de tesis y a los resultados.
- III Procedimientos para la ejecución de la investigación describe el procedimiento utilizado en el presente proyecto de investigación, se detallan las variables, población y muestra, y el proceso metodológico para el tratamiento de los resultados.
- IV Análisis e interpretación de resultados que describe en primer lugar la información cuantitativa, análisis y discusión de resultados según las dimensiones del estudio. Se coteja los resultados con la normatividad actual y el marco teórico.

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones sintetizan los logros obtenidos tras la discusión de resultados y la prueba de hipótesis. Las recomendaciones están dirigidas a los ingenieros, estudiantes y técnicos dedicados al área de transportes.

Espero que los resultados finales contribuyan al lector en lo que se refiere a la evaluación de pavimentos.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La red vial departamental del país, tiene especial importancia como base para el desarrollo, bienestar económico y social de las regiones. Es un valioso patrimonio nacional que se debe cuidar y preservar mediante un mantenimiento adecuado y oportuno que permita una transitabilidad adecuada para los usuarios.

Por ello, para el mantenimiento de vías pavimentadas en el Perú, se viene incrementando la utilización de los diferentes parámetros de evaluación, al respecto se ha analizado internacionalmente, que una apropiada evaluación contribuye a obtener un eficiente mantenimiento de la red de caminos y disminuye significativamente los costos de operación de los vehículos, reduce los tiempos de recorrido, mejora el confort para la circulación vehicular y aminora los accidentes de tránsito por causa del mal estado de la vía, es por tal motivo que es imprescindible conocer el estado en que se encuentran las vías luego de su construcción.

Así, por ejemplo, tenemos la red vial nacional con código de Ruta Emp. PE – 3S (Puno) – Vilque – Mañazo – Emp. PE – 34 A (Huataquita), ubicada en el departamento de Puno, en la cual se debe estar realizando trabajos de mantenimiento rutinario, periódico y de emergencia de ser el caso, para garantizar el adecuado tránsito vehicular, para lo cual es necesario evaluar ciertos parámetros que nos permitan saber el estado actual de la carretera.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Por tal motivo, surge la interrogante:

PRINCIPAL

- ¿Cuál será el estado actual del pavimento respecto a la deflectometría y el índice de regularidad internacional de la vía Puno – Vilque – Mañazo, en los 4km más críticos?

ESPECÍFICAS

- ¿Cuál es el estado actual de acuerdo al método del índice de condición de pavimento de la vía Puno – Vilque – Mañazo?
- ¿Cuál es el estado actual del pavimento de la vía en cuanto a las deflexiones?
- ¿Cuánto será el índice de regularidad internacional del pavimento de la vía Puno – Vilque - Mañazo en unidades Merlin?
- ¿Cuál será el estado actual de acuerdo al método destructivo, referido a la extracción de muestras insitu en dos puntos críticos del tramo objeto de la investigación?

Por lo cual se evaluará los 4 kilómetros más críticos del tramo con ensayos de DEFLECTOMETRÍA Y REGULARIDAD de acuerdo al control establecido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones para este tipo de estructura. Mediante estos ensayos se podrá evaluar la DEFLEXIÓN y el ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL de la carretera, y así poder evaluar el comportamiento actual del pavimento.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Se considera importante la realización del presente trabajo de investigación, ya que se podrá conocer el estado situacional de la vía Puno – Vilque – Mañazo. Por los métodos deflectométricos y de Índice de Rugosidad Internacional IRI, con la finalidad de ampliar la evaluación, se realizará la evaluación del pavimento mediante el Índice de Condición de Pavimento, y por último, la evaluación del material existente mediante el método destructivo (extracción de muestras por calicatas). En nuestro país no existe mucha experiencia en la evaluación conjunta tanto de la parte funcional, estructural y calidad de material, siendo este tramo Puno – Vilque – Mañazo una de las carreteras adecuadas para realizar una evaluación por su aparente estado ineficiente de serviciabilidad.

A su vez, el presente trabajo está destinado a evaluar los niveles de calidad exigidos por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones en el Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” en cuanto a la deflexión característica y el Índice de Regularidad Internacional (IRI), que permita utilizar estos parámetros como indicadores del estado funcional y estructural del pavimento ya sea para plantear

alternativas de mantenimiento o rehabilitación, logrando de esta manera mejorar la serviciabilidad del pavimento en estudio.

Además interesa dar a conocer los resultados, conclusiones y sugerencias para que sean tomados en consideración por parte de las instituciones dedicadas a la ejecución de obras viales para mejorar la calidad de éstas.

1.4 ANTECEDENTES

Los antecedentes de investigación referentes al tema son:

- ✓ Estudio de la regularidad en pavimentos asfálticos de la ciudad de Puno – Tesis de la Universidad Nacional del Altiplano presentada por Marcos Abraham Pari Luque – mayo 2005.

Objetivo.- Determinar la rugosidad de los pavimentos de la ciudad de Puno y su influencia en el grado de serviciabilidad de los mismos.

Metodología.- Primero el reconocimiento del ámbito de estudio, revisión bibliográfica, recopilación de datos usando mira y nivel, registro de datos usando el rugosímetro Merlin, y por último el procesamiento de datos y obtención de resultados.

Resultados.- Se encontró que las vías Panamericana Norte y Sur (salida a las ciudades de Juliaca e Ilave), por las varias etapas de mantenimiento realizadas, la superficie no presenta una uniformidad provocando de esta manera valores de rugosidad bastante elevadas de 6.08 y 5.19 m/km. Correspondiéndole una calificación de “malo” requiriendo una reconstrucción de la superficie de rodadura. El resto de las avenidas evaluadas indica una condición de “regular”, por lo que deben realizarse labores de mantenimiento a fin de recuperar la serviciabilidad deseada.

- ✓ Evaluación, rehabilitación y diseño de pavimentos por el método de las deflexiones de la red vial N° 5 en el tramo Lima – Canta afectadas por el fenómeno del niño '97-'98 presentada por Aguilar Cori, Gabriel Felix - Lima - Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil – 2003.

Objetivo.- Definir el comportamiento del pavimento-subrasante existente mediante la obtención de las deflexiones, complementando con el relevamiento de las fallas y la obtención de la rugosidad.

Metodología.- Primero la medición de deflexiones del pavimento mediante la Viga Benkelman (ensayo no destructivo), se procede con la realización de los

ensayos para la determinación de la rugosidad del pavimento, finalmente se procesan datos.

Resultados.- Las deflexiones en ambos carriles del tramo en estudio varían entre 12×10^{-2} mm a 372×10^{-2} , las que son inferiores y superiores a la admisible, lo que indica un inadecuado comportamiento estructural del pavimento, salvo excepciones puntuales. La rugosidad en ambos carriles resulta en una valoración de “muy malo”, según el Índice de Rugosidad Internacional con valores entre 0.33 y 2.49 con excepciones puntuales.

- ✓ Metodología para la determinación de la regularidad de los pavimentos con equipos de bajo costo y gran precisión – Ing. Pablo del Águila Rodríguez.

Objetivo.- Establecer una metodología que permita una mayor eficiencia, han sido las de estudiar las fuentes que inciden en el bajo rendimiento del equipo y desarrollar métodos que permitan procesos automatizados, complementándose esto con la inclusión de criterios de análisis y especificaciones técnicas para la calificación de los resultados, lo que ha sido posible por la experiencia ganada entre 1993 y 1998, luego de la evaluación de más de 3,000 km de pavimentos en más de 100 proyectos de carreteras en el Perú.

Metodología.- En base a la experiencia luego de la evaluación de más de 3,000 km de pavimentos en el Perú.

Resultados.- La rugosidad o regularidad superficial se deberá controlar calculando el parámetro denominado IRI característico, el cuál es definido por la siguiente expresión:

$$IRI_c = IRI_p + 1.645\sigma$$

Donde:

IRI_c : IRI característico

IRI_p : IRI promedio

σ : Desviación estándar

De acuerdo al factor de correlación empleado ($K=1.645$), se cumplirá que el 95% del pavimento experimentará una rugosidad igual o menor al IRI característico.

- ✓ Cálculo del índice de condición del pavimento flexible en la Av. Luis Montero, distrito de Castilla – Est. Edgar Daniel Rodríguez Velásquez – Piura – Universidad de Piura – Facultad de Ingeniería Civil – 2010.

Objetivo.- Aplicar el método PCI para determinar el Índice de Condición de Pavimento en la Av. Luis Montero. Mil doscientos metros lineales de pavimento, para identificar las fallas existentes y cuantificar el estado de la vía.

Metodología.- Se empleó una metodología ordenada como se indica a continuación: primero se realizó la inspección visual, identificando la clase, severidad y cantidad de fallas, luego se procede con el cálculo del índice que cuantifica el estado en que se encuentra el pavimento analizado, es decir, señala si el pavimento está fallado, si es malo, muy malo, regular, si es bueno, muy bueno o excelente.

Resultados.- Agrupando los resultados de las cuatro (4) secciones y treinta y dos (32) unidades de muestras de la vía en evaluación, se tiene un PCI promedio de 56, lo que corresponde a un pavimento “bueno”.

- ✓ Consideraciones para la aplicación del índice de fricción internacional en carreteras de México – Instituto Mexicano de Transporte – Diana Berenice López Valdés, Paul Gamica Anguas – 2001.

Objetivo.- El objetivo general del experimento fue el de comparar la gran diversidad de métodos de evaluación usados alrededor del mundo y desarrollar un método capaz de convertir los resultados producidos por diferentes equipos a una escala común llamada Índice de Fricción Internacional (IFI), de esta manera proveer una base para la estandarización y armonización internacional. Cada país podrá ser capaz de continuar usando sus métodos tradicionales de medición mientras permanece siendo posible la relación con el índice internacional (IFI). Además, los procedimientos fueron creados de tal manera que permitirán al método extenderse a equipos que no participaron en el experimento.

Metodología.- Primero se obtiene el IFI a partir de mediciones de textura y resistencia al deslizamiento y, finalmente, su interpretación y utilización en vistas de su aplicación para evaluar periódicamente las condiciones de seguridad en carreteras.

Resultados.- Este índice puede ser utilizado como parámetro de evaluación superficial para incrementar la seguridad de la operación vehicular.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 GENERAL

- Evaluar el estado del pavimento, mediante la deflectometría y rugosidad, en la carretera Puno – Vilque – Mañazo, en los 4 Km más críticos.

1.5.2 ESPECÍFICOS

- Evaluar el estado actual de la vía Puno – Vilque – Mañazo, por el método del índice de condición del pavimento – 2015.
- Evaluar el estado actual de las deflexiones del pavimento de la vía Puno-Vilque-Mañazo en los 4km más críticos del tramo.
- Evaluar con las unidades Merlin el índice de regularidad internacional de la vía Puno – Vilque – Mañazo, en los 4Km más críticos del tramo.
- Evaluar con métodos destructivos la vía Puno – Vilque – Mañazo, en dos puntos críticos del tramo objeto de la investigación.

1.6 HIPÓTESIS

1.6.1 HIPÓTESIS GENERAL

- La evaluación del estado del pavimento de la vía Puno – Vilque – Mañazo, presenta un deficiente desempeño del pavimento.

1.6.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICA

- El estado del pavimento de la vía Puno – Vilque – Mañazo, según el método del índice de condición del pavimento es “malo”.
- La evaluación del estado actual de las deflexiones del pavimento de la vía Puno – Vilque – Mañazo en los 4Km más críticos, resultan ser menores a las deflexiones admisibles.
- La evaluación con unidades Merlin del Índice de Regularidad Internacional del pavimento de la vía Puno – Vilque – Mañazo, en los 4Km más críticos, indica una rugosidad mayor a 2.5 m/km, concordante con la normatividad del MTC.
- La evaluación con métodos destructivos en la vía Puno – Vilque – Mañazo, resultan en un deficiente estado del material que compone la estructura del pavimento, concordante con la normatividad del MTC.

1.7 VARIABLES E INDICADORES

1.7.1 VARIABLE DEPENDIENTE

- IRI, DEFLEXIÓN

Indicadores: Ecuaciones de correlación, factor de corrección de ajuste D, IRI característico, radio de curvatura, longitud elástica.

1.7.2 VARIABLE INDEPENDIENTE

- ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

1.8 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población se considera la vía Puno – Vilque – Mañazo, 4km más críticos.

Las muestras y el número de ensayos se realizarán de la siguiente forma.

- **MÉTODO DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO (PCI)**

Se determinará el tramo de 4km más crítico de la vía Puno – Vilque – Mañazo.

- **DEFLECTOMETRÍA**

Se efectuarán mediciones en los cuatro (04) km más críticos en los dos carriles, en ambos sentidos y en forma alternada cada cincuenta (50) m, en concordancia con la normatividad del MTC.

- **REGULARIDAD:**

La medición de la regularidad sobre la superficie terminada, se efectuará en los 4km más críticos de la vía Puno – Vilque – Mañazo cada dos (02) m y debe involucrar ambas huellas de la vía.

Tabla 1: CUADRO DE RESUMEN DE TIPO Y CANTIDAD DE ENSAYOS A REALIZAR.

ENSAYO	ENSAYO/METRO	DISTANCIA (m)	Nº DE CARRILES	Nº TOTAL DE MUESTRAS
Viga Benkelman	50.00	4,000.00	2.0	160.00
Rugosímetro Merlin	2.00	4,000.00	2.0	4,000.00

- **EXTRACCIÓN DE MUESTRAS INSITU:**

La extracción de muestras se efectuará sobre dos puntos, los cuales se encontrarán dentro de los 4km más críticos de la vía Puno – Vilque – Mañazo, con la finalidad de realizar ensayos de laboratorio.

Tabla 2: CUADRO DE EXTRACCIÓN DE MUESTRAS INSITU.

MUESTRAS	UBICACIÓN
Muestra 01 y 02	Puntos más críticos del tramo objeto de la investigación.

- **UBICACIÓN DEL PROYECTO A EVALUAR**

La carretera Puno – Vilque – Mañazo, se ubica políticamente en la provincia de Puno, departamento de Puno, geográficamente, el tramo a evaluar está ubicado al sureste del Perú, en la Meseta del Collao, con una altitud promedio de 3969 msnm.

El tramo en estudio se inicia a la salida del centro urbano de Puno (a la entrada del camino hacia el penal de Yanamayo) y culmina en el distrito de Mañazo (km 39+900).

Tabla 3: UBICACIÓN MEDIANTE COORDENADAS DE LA VÍA EN EVALUACIÓN.

Lugar	Coordenadas geográficas		Coordenadas UTM	
	Latitud	Longitud	Este	Norte
Puno (km 00+000).	15°48'57.49"S	70° 1'59.34"O	389356.00	8251149.00
Mañazo (km 39+900).	15°48'4.34"S	70°20'36.69"O	356101.60	8252594.48

- **ALTITUD**

La carretera Puno – Vilque – Mañazo, se desarrolla a una altitud por encima de los 3800 msnm. El trazo se inicia a la salida del centro urbano de Puno (3996 m.s.n.m.) y termina en el distrito de Mañazo (3942 m.s.n.m), con una altitud promedio aproximada de 3969 m.s.n.m.

- **ACCESIBILIDAD**

La accesibilidad a la zona de la evaluación es mediante vía terrestre, desde las ciudades de Puno (entrada por Yanamayo), Juliaca (49.5km), Arequipa (249.7km) y Cusco (390.3km), las cuales se encuentran pavimentadas.

- **TOPOGRAFÍA**

La zona a evaluar presenta una topografía regular, llana y poco ondulada.



Figura 1: UBICACIÓN DE LA CARRETERA PUNO – VILQUE - MAÑAZO.

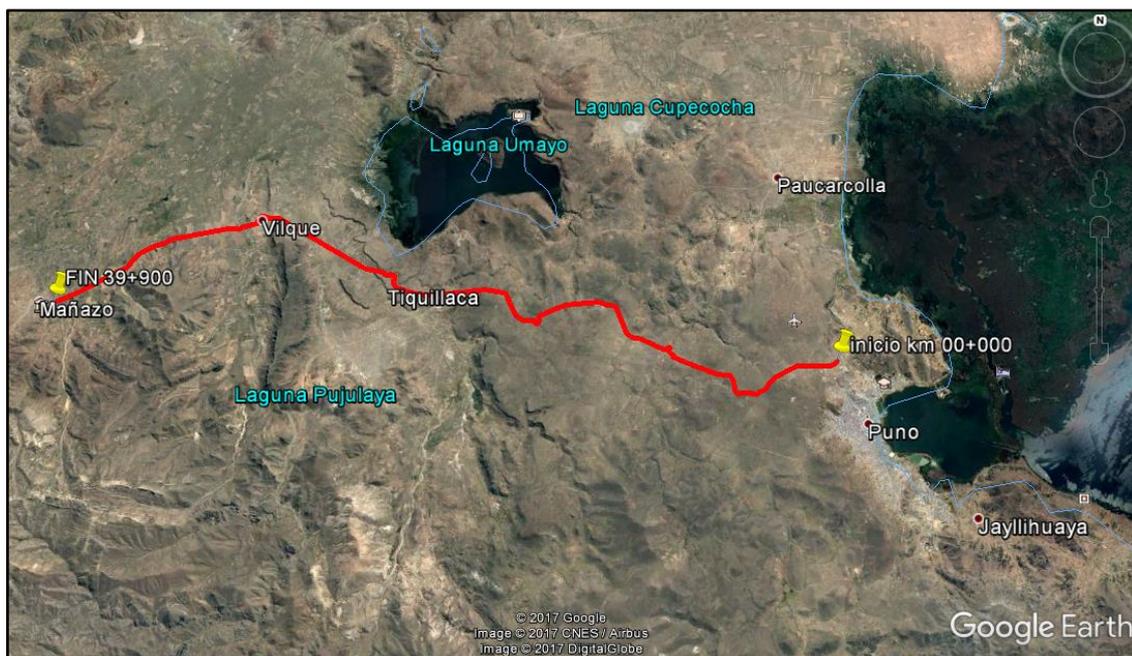


Figura 2: VISTA SATELITAL DE LA VÍA A EVALUAR.



Figura 3: UBICACIÓN DE LOS CUATRO (04) KM MÁS CRÍTICOS DEL TRAMO.

Tabla 4: UBICACIÓN DE LOS CUATRO (04) KM MÁS CRÍTICOS.

Descripción		Longitud	Ubicación	
			Desde	Hasta
Cuatro (04) kilómetros más críticos.	Primer tramo más crítico.	Dos (02) kilómetros.	06+500	08+500
	Segundo tramo más crítico (2km)	Dos (02) kilómetros.	15+400	17+400

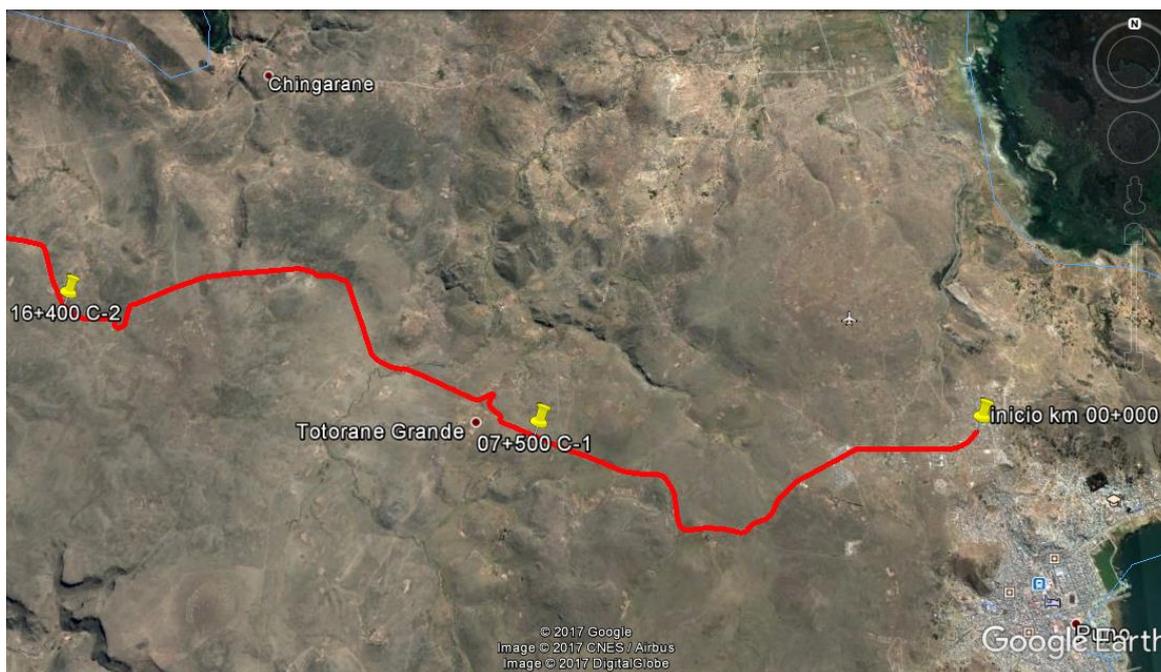


Figura 4: VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DE LAS CALICATAS C-1 Y C-2.

Tabla 5: UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE MUESTRAS INSITU.

Tramo	Descripción	Lugar	Coordenadas UTM	
			Este	Norte
Primer tramo más crítico.	Calicata 1 (C-1)	Km: 07+500	383040.00	8250893.00
Segundo tramo más crítico.	Calicata 1 (C-2)	Km: 16+400	376025.00	8252665.00

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 PAVIMENTO

Un pavimento es un elemento estructural monocapa o multicapa, apoyado en toda su superficie, diseñado y construido para soportar cargas estáticas y/o móviles durante un periodo de tiempo predeterminado. Estando formado por una o varias capas de espesores y calidades diferentes que se colocan sobre el terreno preparado para soportarlo (Vivar Romero, 1995, pág. 01).

2.1.2 CARACTERÍSTICAS QUE DEBE REUNIR UN PAVIMENTO

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Debe ser durable.
- Cumplir requerimientos medio ambientales y estéticos.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- Debe ser económico (Montejo Fonseca, 2006, pág. 02).

2.1.3 PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS

2.1.3.1 RESPUESTAS Y COMPORTAMIENTO

Aunque en apariencia las estructuras de pavimento son simples son en realidad muy complicadas, debido a la gran cantidad de variables que influyen sobre el comportamiento del mismo, por este motivo una gran cantidad de simplificaciones deben ser hechas a fin de analizar la respuesta y comportamiento de un pavimento.

La respuesta estará dada en términos esfuerzos y deformaciones en cada capa de pavimento, el comportamiento en términos de las condiciones estructurales y funcionales son obtenidos a partir de relaciones empíricas con la respuesta del pavimento y el grado de deterioro (Menéndez Acurio, 2009, pág. 09).

2.1.4 TIPOS DE PAVIMENTOS

Se tiene principalmente los siguientes tipos de pavimentos:

2.1.4.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES

Está formado por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y sub base.

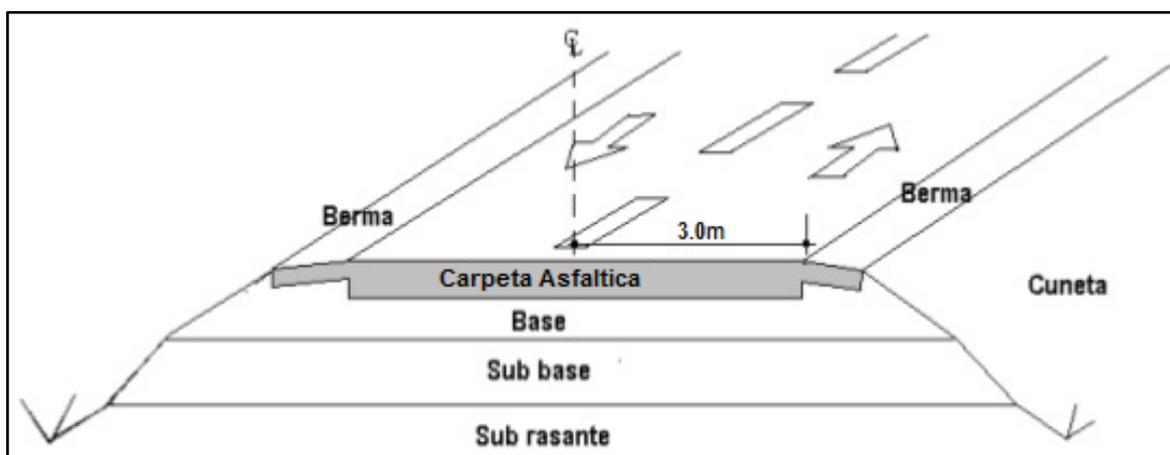


Figura 5: SECCIÓN TÍPICA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.4.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS

Son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa, de material seleccionado la cual se denomina sub base del pavimento rígido. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento (Montejo Fonseca, 2006, pág. 05).



Figura 6: SECCIÓN TÍPICA DE UN PAVIMENTO RÍGIDO.
Fuente: Elaboración propia.

2.1.4.3 PAVIMENTO AFIRMADO

- Vías no pavimentadas.

2.1.5 DEFLECTOMETRÍA

2.1.5.1 GENERALIDADES

Las deflexiones producidas en la superficie de un pavimento flexible, por acción de cargas vehiculares, pueden ser determinadas haciendo uso de deflectómetros tales como el denominado “Viga Benkelman”. Llamado así en honor al Ing. A. C. Benkelman, quien la desarrolló en 1953 como parte del programa de ensayos viales de la WASHO (WASHO Road Test¹). Desde entonces su uso se ha difundido ampliamente en proyectos de evaluación estructural de pavimentos flexibles, tanto por su practicidad como por la naturaleza directa y objetiva de los resultados que proporciona (S. Hoffman & M. del Aguila, 1985, pág. 15).

2.1.5.2 MODELO DE HOGG

2.1.5.2.1 CARACTERÍSTICAS Y UTILIZACIÓN DEL MODELO

El modelo presentado y los conceptos desarrollados en torno a éste, hacen posible caracterizar los materiales del sistema pavimento-subrasante en base al análisis e interpretación de las curvas de deflexiones. Para hacer uso del modelo de Hogg no se necesita conocer el espesor de las capas del pavimento, ya que las curvas de deflexiones de superficie son teóricas y dependen solamente de la *longitud elástica* L_0 , lo que constituye una ventaja ya que, la experiencia demuestra que en la gran mayoría de los pavimentos evaluados, desconoce el espesor o es difícil controlar su variación (S. Hoffman & M. del Aguila, 1985, pág. 10).

¹ (Este experimento vial fue realizado en el estado de Idaho en el año 1952, con el objetivo principal de comprobar el efecto de tipos de ejes e intensidad de cargas sobre los pavimentos flexibles. Se variaron los tipos y espesores de capas en sectores del tramo de prueba y se mantuvo constante la carga aplicada. El principal nuevo resultado obtenido fue la determinación que un eje doble de 12.7 tn producía el mismo efecto que uno simple de 8.2 tn).

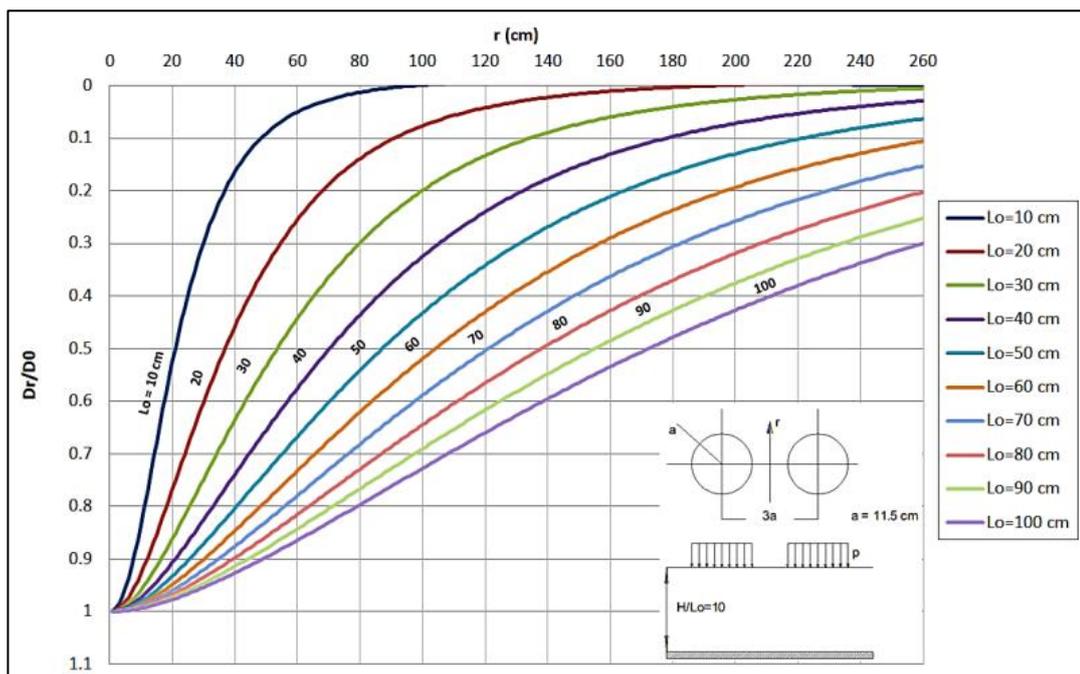


Figura 7: CURVAS DE DEFLEXIONES EN EL MODELO DE HOGG PARA LA CONFIGURACIÓN DE CARGA DE LA VIGA BENKELMAN.

Fuente: ESTUDIOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS BASADOS EN LA INTERPRETACIÓN DE CURVAS DE DEFLEXIONES (S. Hoffman & M. del Aguila, 1985, pág. 11).

En el modelo se introduce, mediante la variable h una capa rígida a una profundidad finita. En el procedimiento de evaluación ésta representa a una capa rocosa existente o funciona como un factor de ajuste que limita la extensión horizontal de las curvas de deflexiones teóricas, que de otra manera serían infinitas, lo que se contradice con las curvas experimentales. Por otro lado, la extensión finita de las curvas de deflexiones medidas puede obedecer a una conducta no-lineal de los materiales del pavimento y subrasante y no implica necesariamente que realmente exista una capa rígida. Para la utilización del modelo se sugiere la introducción de una capa rígida a una profundidad igual a 10 veces la Longitud Elástica del pavimento ($h = 10L_0$).

Las curvas y nomogramas, como los presentados en las figuras 7 y 8, constituyen la implementación práctica del modelo para la evaluación estructural de pavimentos.

La figura 7 muestra las curvas de deflexiones adimensionales (DR/D_0) obtenidas con el modelo de Hogg para una carga que simula la llanta doble utilizada con la Viga Benkelman.

La figura 8 muestra un nomograma preparado en base a las soluciones rigurosas del modelo de Hogg, para determinar el Módulo de Elasticidad de la subrasante (E_0). Este nomograma es para deflexiones medidas con la Viga Benkelman, para una carga de eje de 18 klb, una huella circular de llanta de 11.5 cm, para $R=100$ cm, y para distintos espesores " h " de la profundidad de la capa rocosa.

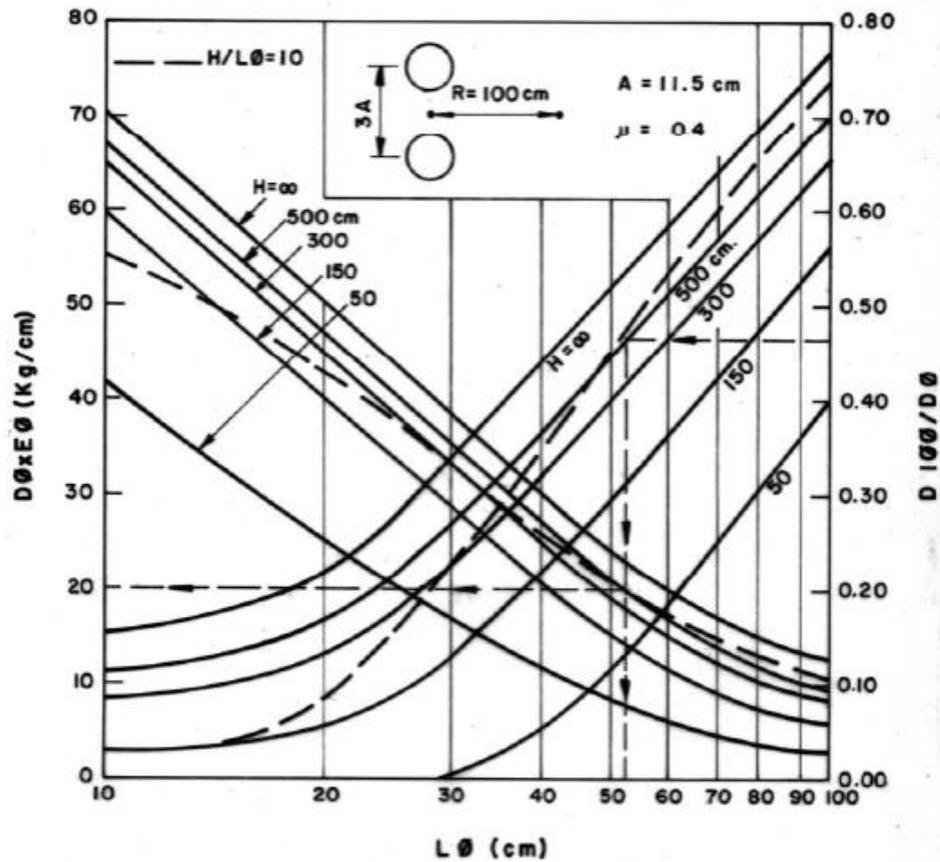


Figura 8: NOMOGRAMA PARA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL BASADA EN EL MODELO DE HOGG (VIGA BENKELMAN).

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones (S. Hoffman & M. del Aguila, 1985, pág. 12).

LA VIGA BENKELMAN

El deflectómetro Benkelman funciona según el principio de la palanca. Es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple. Según se esquematiza en el figura 9, la viga consta esencialmente de dos partes: (1) cuerpo de sostén que se sitúa directamente sobre el terreno mediante tres apoyos (dos delanteros fijos “A” y uno trasero regulable “B”) y (2) un brazo móvil acoplado al cuerpo fijo mediante una articulación de giro o pivote “C”, uno de cuyos extremos apoya sobre el terreno (punto “D”) y el otro se encuentra en contacto sensible con el vástago de un extensómetro de movimiento vertical (punto “E”).

Adicionalmente el equipo posee un vibrador incorporado que al ser accionado, durante la realización de los ensayos, evita que el indicador del dial se trabe y/o que cualquier interferencia exterior afecte las lecturas.

El extremo “D” o “punta de la viga” es de espesor tal que puede ser colocado entre una de las llantas dobles del eje trasero de un camión cargado. Por el peso aplicado se produce una deformación del pavimento, consecuencia de lo cual la punta baja una cierta cantidad, con respecto al nivel descargado de la superficie. Como efecto de dicha

acción el brazo "DE" gira en torno al punto fijo "C", con respecto al cuerpo "AB", determinando que el extremo "E" produzca un movimiento vertical en el vástago del extensómetro apoyado en él, generando así una lectura en el dial indicador.

Si se retiran luego las llantas cargadas, el punto "D" se recupera en lo que a deformación elástica se refiere y por el mismo mecanismo anterior se genera otra lectura en el dial del extensómetro. La operación expuesta representa el "principio de medición" con la viga Benkelman. Lo que se hace después son sólo cálculos en base a los datos recogidos. Así, con las dos lecturas obtenidas es posible determinar cuánto deflectó el pavimento en el lugar subyacente al punto "D" de la viga, durante el procedimiento descrito. Es de anotar que en realidad lo que se mide es la recuperación del punto "D" al remover la carga (rebote elástico) y no la deformación al colocar ésta. Para calcular la deflexión deberá considerarse la geometría de la viga, toda vez que los valores dados por el extensómetro (EE') no están en escala real sino que dependen de la relación de brazos existentes (ver figura 9).

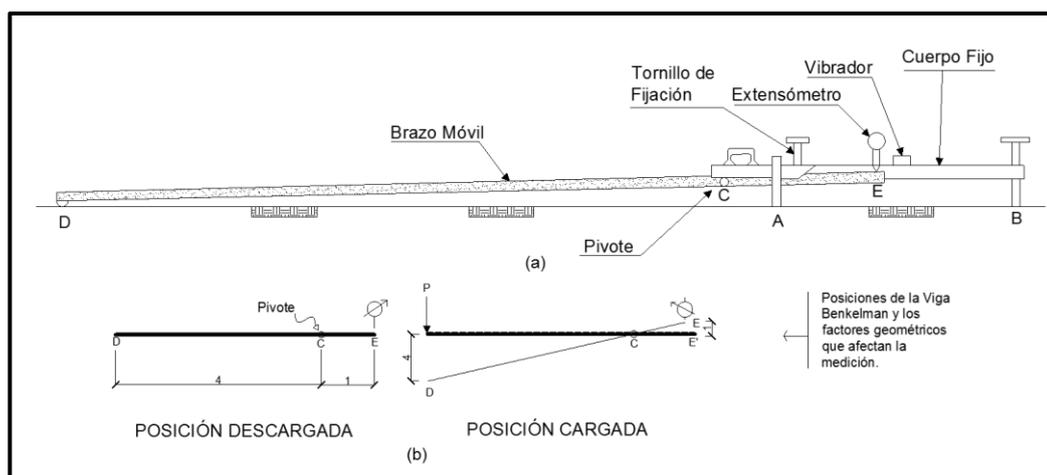


Figura 9: ESQUEMA Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN.

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones (S. Hoffman & M. del Aguila, 1985).

2.1.5.3 EQUIPO REQUERIDO

El equipo mínimo para la realización de ensayos de medición de deflexiones es el siguiente:

- Deflectómetro Viga Benkelman.
- Extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0.01 mm.
- Camión cargado, con eje trasero de 18,000 lb. (8.2 tn) igualmente distribuidas en un par de llantas dobles infladas a una presión de 75 a 85 psi (517 a 586 kilo pascal).
- Vehículo auxiliar para transportar al personal y equipo misceláneo (camioneta).

- e) Balanza portátil para pesaje del camión, con capacidad de 10 toneladas.
- f) Accesorios de medición y varios (cinta métrica de 3m, plumones de punta gruesa, plomada, destornillador, alicates, hojas de campo, lapiceros, señal de seguridad, termómetro, cincel, martillo, varilla de metal o madera de 2m, alambre de amarre, etc.).

2.1.5.4 PROCEDIMIENTO EN EL CAMPO

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada en 9000 lb. (4090 kg), y es proporcionada por una de las llantas dobles del eje trasero de un camión. Previamente a la realización de los ensayos deberá verificarse que se cumpla esta condición, así como que la presión de las llantas sea la requerida.

Una vez localizado el lugar donde se realizará el ensayo (usualmente los puntos de medición se localizan en la mitad exterior de un carril), se coloca la llanta a usarse sobre el punto de manera tal que éste coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto (ver figura 10a, punto "D").

Para esta operación es aceptable una tolerancia en el rango de 3 pulgadas alrededor del punto. Estacionados los neumáticos se inserta entre ellos el extremo del brazo móvil de la viga colocándolo nuevamente sobre el punto de ensayo seleccionado. Dado que éste último dificulta por la inaccesibilidad tanto visual como manual, se realizará previamente la siguiente operación: se coloca la viga en posición como si estuviera entre las llantas pero en la parte exterior de las mismas haciendo coincidir, empleando una plomada, el extremo del brazo móvil con el eje vertical del centro de gravedad.

Tomando como punto de referencia una varilla vertical adosada a la parte trasera del camión (ver figura 10b), se efectúa una marca en la viga de manera tal que, en adelante, basta con hacerlas coincidir (la marca con la varilla vertical) para asegurarse que el extremo de la viga coincide con el centro de las llantas, en el momento de iniciar las mediciones.

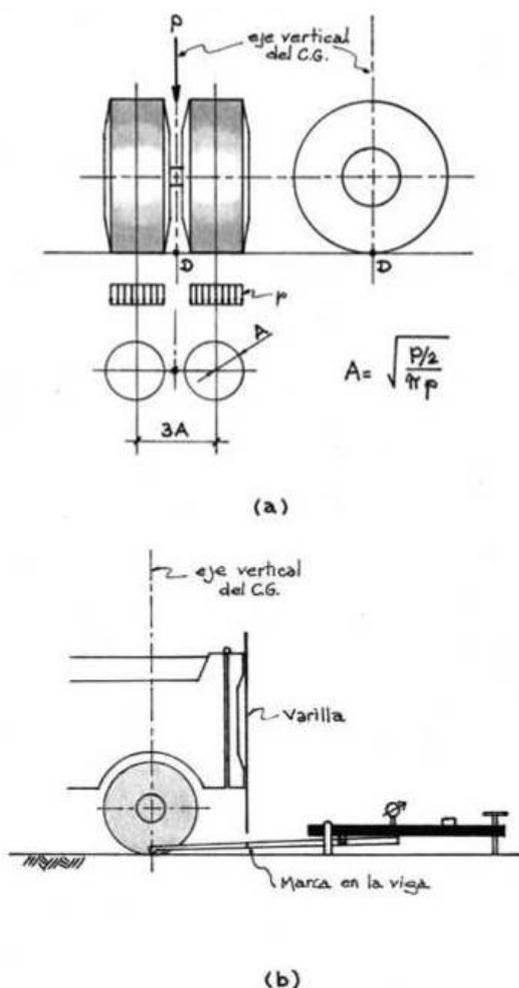


Figura 10: CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DEL SISTEMA DE CARGA EN ENSAYOS CON LA VIGA BENKELMAN.

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones (S. Hoffman & M. del Aguila, 1985).

De igual forma se puede efectuar, a partir de la primera, sucesivas marcas a distancias elegidas a las cuales se desee medir deflexiones adicionales (puede ser a 30, 40 y 50cm). Para la metodología de análisis se requiere de por lo menos tres lecturas, pero se pueden obtener más con fines de verificación, lo cual es recomendable, o si es que se desea tener una idea gráfica del tipo de curvas de deflexiones que se producen.

Como normal se realiza la primera marca adicional a una distancia tal que la deflexión que se obtenga en ese punto sea la mitad de la deflexión máxima (obtenida en la marca inicial). La segunda marca adicional se realizará al doble de la distancia de la primera marca adicional.

Estas dos distancias se determinan específicamente para cada proyecto de evaluación que se emprenda. Esto deberá hacerse por medio de tanteos previos, antes de comenzar la recolección masiva de datos. Es común que se observen variaciones durante la realización de los ensayos, pero no deberá hacerse modificaciones mientras

que las deflexiones tomadas en la primera marca adicional estén en el rango entre 35% y 65% de la deflexión máxima.

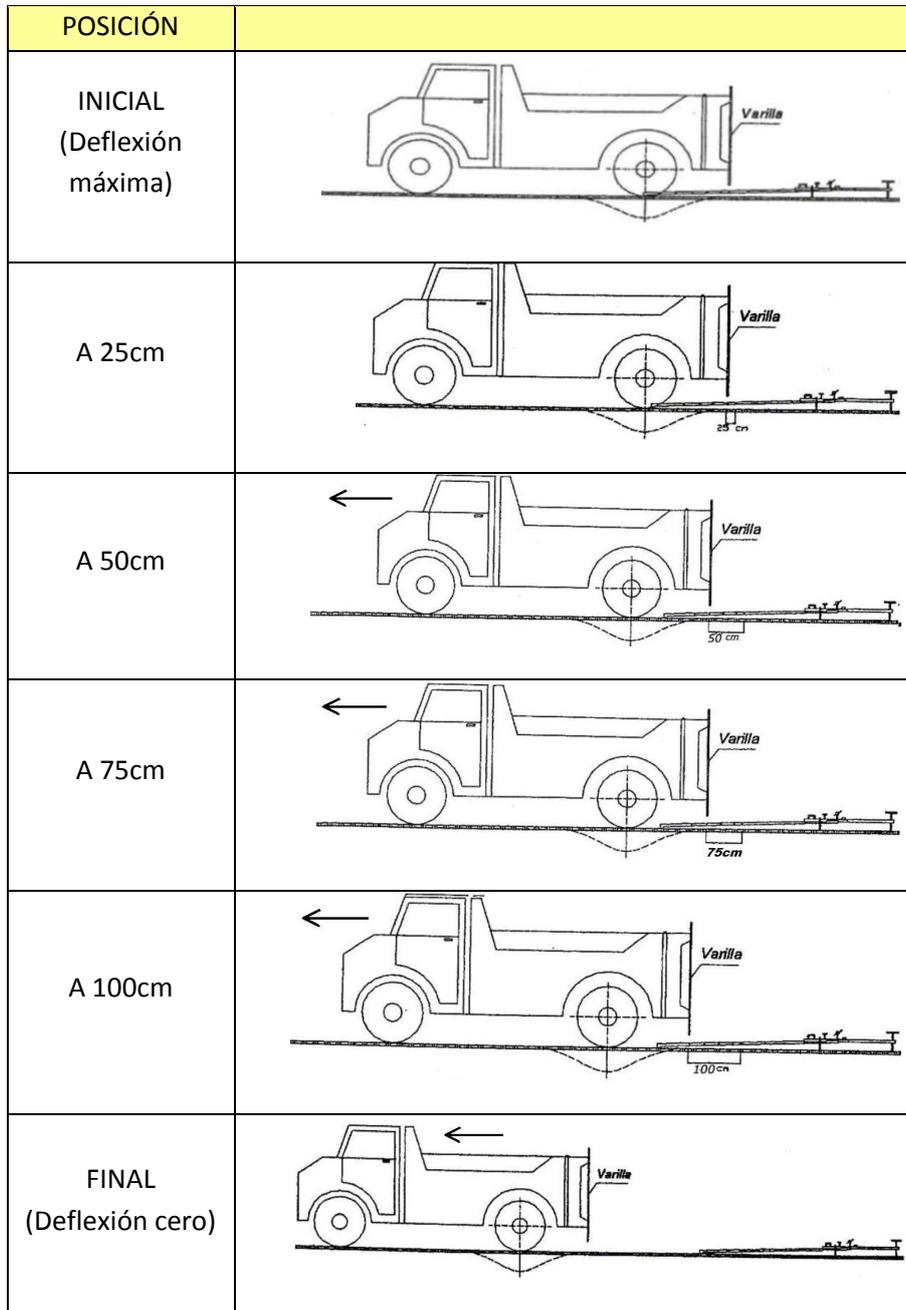


Gráfico 1: ESQUEMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN CON LA VIGA BENKELMAN.

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones (S. Hoffman & M. del Aguila, 1985).

Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la cadena vertical y la marca inicial (ver gráfico 1), se verificará que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se pondrá el dial del extensómetro en cero, se activará el vibrador y mientras el camión se desplaza muy lentamente se procederá a tomar lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con la primera y segunda marcas adicionales (ver gráfico 1) y una lectura final cuando

el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo que el indicador del dial ya no tenga movimiento (aproximadamente 5m.), registro que corresponde al punto de referencia con deflexión cero.

Para la realización de esta rutina será necesario del concurso de tres operadores: un técnico calificado que lea y dicte las lecturas, un operador que anote las mediciones y un ayudante que coordine con el conductor del camión y a la vez de aviso al técnico que realiza las lecturas, cuando la varilla adosada al camión vaya coincidiendo con las marcas hechas en la viga.

Todo el trabajo deberá ser supervisado permanentemente por un ingeniero de campo quien verificará los valores que se vayan obteniendo así como tomará anotación de cualquier factor que a su juicio pueda explicar los resultados que se obtengan (corte, relleno, tipo de material, presencia de alcantarillas, napa freática, estado del pavimento, etc.). La tabla 6 muestra un formato adecuado para la recopilación de datos de campo.

Tabla 6: HOJA DE CÁLCULO PARA LA RECOPIACIÓN DE DEFLEXIONES.

		EVALUACIÓN DEFLECTOMÉTRICA (VIGA BENKELMAN) : MODELO ELASTICO HOGG													
Nombre del proyecto:															
Carril :		Peso total eje posterior :				Fecha :									
Estrc. Pav.:		Presión de inflado :				Realizado por :									
N°	Prog. (Km)	Lado	Lecturas de Campo						Deflexiones					Observaciones	
			L ₀	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	L _{MAX}	D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀		
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															

Fuente: Elaboración propia.

2.1.5.5 CÁLCULO DE LAS DEFLEXIONES

Una vez tomados los datos de campo, el cálculo de las deflexiones para cada estación consiste en sustraer la lectura final (punto de referencia de deflexión cero) a cada una de las otras, representando las respectivas diferencias la deformación en dichos puntos, las cuales en conjunto definen la curva de deflexión de superficie del pavimento.

2.1.5.5.1 DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA

Es el valor que mejor representa a un determinado sector evaluado. La fórmula a utilizar para su cálculo se establece de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 7: DEFLEXIONES CARACTERÍSTICAS SEGÚN EL TIPO DE CARRETERA.

Tipo de carretera	Deflexión característica D_c	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	$D_c = D_m + 1.645 \cdot \sigma$	Deflexión característica, para una confiabilidad de 95%.
Carreteras cuales o multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	$D_c = D_m + 1.645 \cdot \sigma$	Deflexión característica, para una confiabilidad de 95%.
Carreteras de primera clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	$D_c = D_m + 1.645 \cdot \sigma$	Deflexión característica, para una confiabilidad de 95%.
Carreteras de segunda clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	$D_c = D_m + 1.282 \cdot \sigma$	Deflexión característica, para una confiabilidad de 90%.
Carreteras de tercera clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	$D_c = D_m + 1.282 \cdot \sigma$	Deflexión característica, para una confiabilidad de 90%.
Carreteras de bajo volumen de tránsito: carreteras con un IMDA \leq 200 veh/día, de una calzada.	$D_c = D_m + 1.036 \cdot \sigma$	Deflexión característica, para una confiabilidad de 85%.
Nota: D_c = Deflexión característica, D_m =Deflexión media, σ =Desviación estándar.		

Fuente: Manual de Carreteras "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos" – 2013 – MTC..

2.1.5.6 RADIO DE CURVATURA

La línea elástica de la deformación, especialmente debajo del punto inicial de aplicación de la carga, presenta el principal y más importante grado de curvatura (curvatura máxima) que se puede evaluar en el análisis de la deflexión.

Al analizar los diversos procedimientos para determinar el grado de curvatura máximo de la deformada, lo que se presenta más simple y expedito para ese fin como comprobaciones experimentales, es la verificación de que la línea de deflexión se aproxima mucho a la forma de una parábola hasta una distancia un poco mayor que 0,25 metros para ambos lados del eje de aplicación de la carga (Madruga Ferreira, 2007, pág. 14).

El radio de curvatura según el Manual de Ensayo de Materiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, puede ser calculado por la fórmula:

$$RC = \frac{3125}{D_0 - D_{25}} \quad \text{Fórmula 1: RADIO DE CURVATURA.}$$

Donde:

RC : Radio de curvatura.

D0 : Deflexión recuperable en el eje vertical de carga, en centésimas de milímetro ($\text{mm} \cdot 10^{-2}$).

D25 : Deflexión recuperable a 25 centímetros del eje vertical de carga, en centésimas de milímetro ($\text{mm} \cdot 10^{-2}$).

2.1.5.6.1 ANÁLISIS DE LOS RADIOS DE CURVATURA

Es muy importante entender el significado de los radios de curvatura, pues de acuerdo con sus valores asociados con los valores de deflexión correspondientes, se pueden establecer diversas conclusiones con respecto a la calidad de las capas que constituyen el pavimento que está siendo analizado.

En principio, las grandes deflexiones podrían estar simplemente producidas por deficiencias de calidad de las capas inferiores del pavimento, en especial de la subrasante, pero no siempre es lo que parece, sin embargo, la situación se vuelve más clara cuando se evalúa en conjunto la deflexión con el radio de curvatura, más o menos de acuerdo con los siguientes casos (Madruga Ferreira, 2007):

a) Baja deflexión y grandes radios de curvatura

El suelo estará en buen estado, tanto las capas superiores como las inferiores estarán de acuerdo a los requerimientos de calidad si la deflexión superficial es menor a la deflexión máxima admisible.

b) Baja deflexión y pequeños radios de curvatura

Probablemente la capa superior estará con calidad deficiente (granulometría, grado de compactación, CBR, etc.). En principio el problema no se concentra en las capas inferiores porque las deflexiones son bajas pero el caso requiere una investigación más cuidadosa.

c) Altas deflexiones y grandes radios de curvatura

En principio, en el caso se presentan grandes deflexiones en las capas subyacentes que es donde debe estar concentrado el problema de deficiencia en la

calidad de materiales o humedad excesiva, independientemente de la calidad de los materiales de las capas superiores que puedan tener calidad satisfactoria o no.

d) Altas deflexiones y pequeños radios de curvatura

El suelo será totalmente deficiente, no cumplirá con los requerimientos de calidad tanto en las capas superiores como inferiores, está construido con materiales inadecuados y/o las capas han sido deficientemente compactadas, y/o las condiciones de drenaje son insatisfactorias.

2.1.5.7 MÉTODO DE ANÁLISIS

A continuación se presentan los diferentes pasos de interpretación con los respectivos algoritmos y ejemplos de su utilización.

Estos algoritmos pueden resolverse manualmente cuando no se dispone de una computadora. A pesar que la metodología presentada es para ensayos con la Viga Benkelman, ésta es adaptable a mediciones con otros aparatos o métodos de medición de deflexiones.

2.1.5.7.1 MODELO DE CARGA

La carga en el ensayo con la Viga Benkelman proviene del eje trasero simple con llanta doble de un camión. La carga del eje es del orden de los 18,000 lb (8.2 tn) y la presión de inflado es de 75 a 85 psi. Se asume que la presión de inflado es igual a la presión de contacto, que la huella de contacto de cada llanta es circular y de radio "A" y, que hay una distancia de "3A" entre los centros de cada llanta, por equilibrio se establece la siguiente relación:

$$A = \sqrt{\frac{P/2}{\pi\rho}} \quad \text{Fórmula 2: RADIO DE LA HUELLA CIRCULAR DE CONTACTO}$$

Donde:

A= Radio de la huella circular de contacto.

P= Carga sobre una llanta.

ρ = Presión de inflado.

De esta manera, si la carga del eje es de 18,000 lb (4,500 lb por llanta) y la presión de inflado es de 80 psi.

$$A = \sqrt{\frac{4500}{\pi(80)}} = 4.23" = 10.7cm$$

El análisis y el programa de computadora aceptan cualquier valor de carga y presión de inflado.

2.1.5.7.2 DETERMINACIÓN DE R5

R5 es la distancia “R” del centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal, en la cual se obtiene que la relación DR/D0 = 0.5 en la curva de deflexiones.

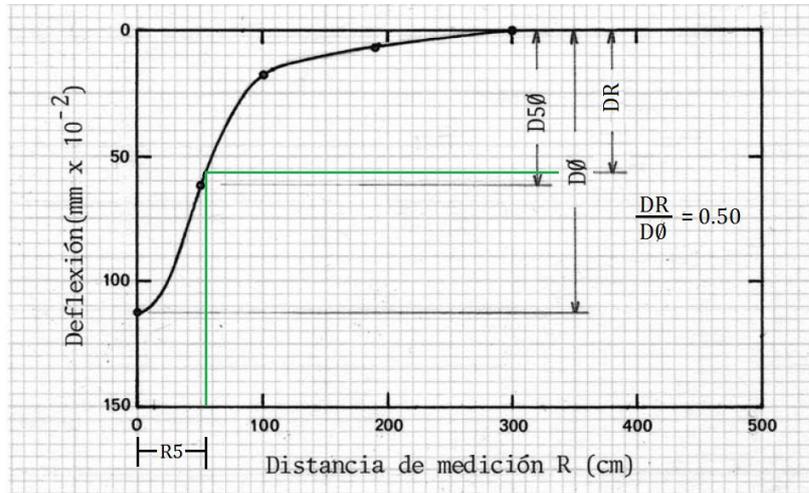


Gráfico 2: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE R5.

Fuente: Elaboración propia.

Para el modelo de HOGG se ha establecido que R5 puede determinarse usando la siguiente ecuación:

$$R5 = R \frac{A^C - B}{\left(A \left(\frac{D0}{DR} - 1 \right) \right)^C - B} \quad \text{Fórmula 3: R5}$$

Donde:

R= distancia a la que se mide la deflexión DR (Ejemplo: R=60cm).

D0= Deflexión máxima.

DR= Deflexión a la distancia R.

A, B y C= Coeficientes de correlación cuyo valor se indica en la tabla 8.

Tabla 8: COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PARA EL CÁLCULO DE R5 EN EL MODELO DE HOGG.

H/H0	μ	A	B	C
∞	Cualquier valor	3.115	0	0.584
10 DR/D0>0.7	0.5	2.56	0	0.592
10 DR/D0<0.7	0.5	371.1	2	0.219
10 DR/D0>0.426	0.5	2.629	0	0.548
10 DR/D0<0.426	0.5	2283.4	3	0.2004

Fuente: Tabla presentada en el modelo matemático realizado por A.H.A. Hogg. (1994).

Ejemplo del cálculo del R5:

$$\mu=0.4; H/L0=10; D0=0.85\text{mm}; DR=0.34\text{mm}$$

$$R=40\text{cm}; DR/D0=0.34/0.85=0.40 < 0.426$$

$$\text{Entonces: } A=2283.4, B=3, C=0.2004$$

Reemplazando en la fórmula 3 se tiene:

$$R5 = 40 \frac{2283.4^{0.2004} - 3}{\left(2283.4 \left(\frac{0.85}{0.34} - 1\right)\right)^{0.2004} - 3}$$

$$R5 = 32.4\text{cm}$$

2.1.5.7.3 DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD ELÁSTICA (L0)

La longitud elástica (L0) del pavimento puede calcularse usando la fórmula 4.

$$L0 = \frac{YR5 + \sqrt{(YR5)^2 - 4AXR5}}{2} \qquad \text{Fórmula 4: } L0$$

Donde:

R5= Cálculo en la fórmula 3.

A= Radio de la huella circular de carga.

X, Y= Coeficiente de correlación cuyo valor se indica en la siguiente tabla.

Tabla 9: COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE L0 EN EL MODELO DE HOGG.

H/H0	μ	X	Y
10	0.5	0.183	0.620
10	0.4	0.192	0.602
∞	Cualquier valor	0.180	0.525

Fuente: Tabla presentada en el modelo matemático realizado por A.H.A. Hogg. (1994).

Nota: El valor de L0 sirve de insumo para determinar el módulo de elasticidad de la subrasante (E0) según se explica a continuación:

2.1.5.7.4 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA SUBRASANTE (E0)

La determinación del módulo de elasticidad de la sub rasante constituye un punto central de la metodología de evaluación. Para desarrollar soluciones numéricas programables en computadora, esta determinación se efectúa en dos pasos:

- (i) Primer paso: Consiste en establecer la relación teórica entre la rigidez para carga puntual y la rigidez para carga distribuida sobre un área, para un cociente dado

del valor $A/L0$. La rigidez se define como el cociente entre la carga de flexión ($S=P/D0$); la relación teórica se calcula por medio de la ecuación:

$$\frac{S_0}{S} = 1 - M \left(\frac{A}{L0} - 1.10 \right)$$

Fórmula 5: RELACIÓN ENTRE RIGIDECES PUNTUAL Y DISTRIBUIDA

Donde:

S_0 : Rigidez para carga puntual.

S : Rigidez para carga de área.

M : Coeficiente numérico que adopta los siguientes valores:

Para $H/L0=10$; $\mu=0.5$; $M=0.52$

Para $H/L0=10$; $\mu=0.4$; $M=0.48$

Para $H/L0=\infty$; μ =cualquier valor; $M=0.44$.

- (ii) Segundo paso: Una vez determinado el valor de $S0/S$, se calcula el módulo de elasticidad de la subrasante por medio de la siguiente ecuación:

$$E0 = \left(\frac{KxlxP}{L0xD0} \right) \frac{S_0}{S}$$

Fórmula 6: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA SUBRASANTE

Donde:

K : Coeficiente numérico que depende de Poisson de la Subrasante y que adopta los siguientes valores:

Para $\mu=0.5$, $K=1.5$

Para $\mu=0.4$, $K=1.633$

L : Coeficiente numérico que adopta los siguientes valores:

Para $H/L0=10$; $\mu=0.4$; $l=0.1689$

Para $H/L0=10$; $\mu=0.5$; $l=0.1614$

Para $H/L0=\infty$; μ =cualquier valor; $l=0.1925$

P : Carga total en la llanta doble.

$L0$ = Longitud elástica (fórmula 4).

$D0$ =Deflexión máxima.

2.1.5.7.5 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (E^*)

El módulo de elasticidad equivalente del pavimento (E^*) representa a todas las capas del pavimento por encima de la subrasante. Para un pavimento flexible típico, compuesto de carpeta asfáltica y base granular, el módulo E^* representa a la carpeta y la base combinadas con un espesor total igual a la suma de los espesores de cada capa.

Una solución programable aproximada ha sido propuesta por Ullidtz y se basa en los siguientes conceptos. El módulo (E^*) de la carpeta asfáltica y la base, con un espesor

HC=H1+H2 se determina usando el concepto de espesor equivalente. Este espesor equivalente se determina con la siguiente ecuación:

$$HE = (0.9)(HC) \left(\frac{E^*}{E0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Fórmula 7: ESPESOR EQUIVALENTE}$$

La relación entre la deflexión máxima (D0), el módulo de elasticidad de la subrasante (E0) y el módulo de elasticidad del pavimento (E*) está expresada por la siguiente ecuación:

Fórmula 8: MÓDULO DE ELASTICIDAD EQUIVALENTE

$$D0 = \frac{(1 - \mu)P}{2\pi} \left[\frac{1}{E^*} \left[\frac{2(1 - \mu)}{r} - \frac{1}{R1} \left(2(1 - \mu) + \left(\frac{Z1}{R1} \right)^2 \right) \right] + \frac{1}{E0} \left[\frac{1}{R2} \left(2(1 - \mu) + \left(\frac{Z2}{R2} \right)^2 \right) - \frac{1}{R3} \left(2(1 - \mu) + \left(\frac{Z3}{R3} \right)^2 \right) \right] \right]$$

Donde:

r : 1.5xA

Z1: HC + 0.6xA²/HC

$$R1 = \sqrt{Z1^2 + (1.5A)^2}$$

Z2: HE + 0.6xA²/HE

HE: Fórmula 7

$$R2 = \sqrt{Z2^2 + (1.5A)^2}$$

$$Z3 = (HE + (N)(L0)) + 0.6A^2 / (HE + (N)(L0))$$

$$R3 = \sqrt{Z3^2 + (1.5A)^2}$$

N : 10 para base rocosa a espesor finito (H/L0=10).

N : 100 para base rocosa a espesor infinito (H/L0=infinito).

P : Carga de ensayo = πA²xρ (ρ=presión de inflado).

La fórmula 8 se resuelve iterativamente en la computadora para determinar el valor de E* para cualquier combinación de valores de E0, HC, P, ρ, D0, R, DR, H/L0 y coeficiente μ.

2.1.5.8 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN

Según se ha expuesto, la metodología de evaluación estructural de pavimentos basada en la interpretación de deflexiones de superficie se sustenta matemáticamente en el Modelo de Hogg y en conceptos de la teoría de la elasticidad y resistencia de

materiales. Los insumos para el procedimiento de los datos se dividen en cuatro (4) categorías:

- a) Datos de carga (P y ρ).
- b) Deflexiones métricas (D_0 , D_R y R).
- c) Datos de pavimento (espesores y características de las capas).
- d) Parámetros del modelo (H/H_0 y μ).

La metodología por su parte, produce los siguientes datos de salida: L_0 , E_0 , E^* . Obviamente, los datos de salida dependen de los datos de entrada. La carga de ensayo es generalmente un dato fijo para cada proyecto y salvo circunstancias especiales debe estar en el rango recomendado de $P= 18$ kilo-libras y $\rho= 75-85$ psi. Las deflexiones medidas son el resultado de los ensayos y varían seguramente de proyecto a proyecto y entre diferentes puntos de un mismo proyecto debido a la heterogeneidad del pavimento y su subrasante y a errores inestables de medición.

La selección de una o más distancias “ R ” depende del criterio del ingeniero, aunque es común y práctico medir, como mínimo, D_0 , D_{40} , D_{50} y D_{100} a distancias de 0, 40, 50 y 100cm. del eje de la carga.

Los espesores y características de las capas del pavimento no siempre se conocen, a menos que existan datos históricos de construcción y/o diseño o se perforen calicatas. Esta información es necesaria para determinar “ HC ”, cuyo valor influye en “ E ”, pero no influye en los valores de “ L_0 ” y “ E_0 ”, siendo esta una característica importante del modelo de Hogg. El significado de los parámetros de modelo se discute a continuación.

2.1.5.8.1 SIGNIFICADO DE L_0

La longitud característica (L_0) del pavimento es, por definición, un parámetro que refleja la rigidez relativa entre un pavimento y su subrasante. Por tratarse de una relación de rigideces, el valor de L_0 permite una rápida evaluación cualitativa del sistema pavimento – subrasante.

En el extremo de la escala puede pensarse en un pavimento rígido (losa de concreto) sobre una subrasante débil con un L_0 del orden de los 80 cm. En el otro extremo se encuentra un pavimento compuesto de una capa granular sin revestimiento sobre una subrasante fuerte y un L_0 del orden de los 15 cm. No hay que olvidar que se trata de una relación de rigideces de manera que un valor bajo de L_0 puede corresponder tanto al caso de un buen pavimento sobre una buena subrasante como el caso de un mal pavimento sobre una débil subrasante.

La determinación de L_0 en el proceso de evaluación depende solamente del cociente DR/D_0 y el valor R . es decir que dos pavimentos cualesquiera con igual cociente DR/D_0

a una misma distancia R dada, tienen el mismo L_0 aunque DR y D_0 sean diferentes. Los valores específicos de D_0 y DR influyen en los módulos E_0 y E^* según se explica más adelante.

2.1.5.8.2 SIGNIFICADO DE E_0 Y SU RELACIÓN CON EL CBR

El parámetro E_0 representa el módulo de elasticidad de la masa subsuelo que participa en la deformación del sistema pavimento – subrasante. En la fórmula 6 puede verse que E_0 es inversamente proporcional a D_0 y a L_0 , es decir que E_0 es menor cuanto mayor es la deflexión y la longitud característica del pavimento para una relación de rigideces S_0/S dada, y viceversa. El primer paso correspondiente a un pavimento que tiene una curva de deflexiones profunda y extensa y en general, puede establecerse las relaciones cualitativas entre las características de la curva de deflexiones y el sistema, que se ilustran en el gráfico 3.

Cabe insistir que las deflexiones del gráfico 3 son relaciones comparativas generales que pretenden ayudar en la visualización del significado de E_0 y el pavimento en relación con las características de la curva de deflexiones medida.

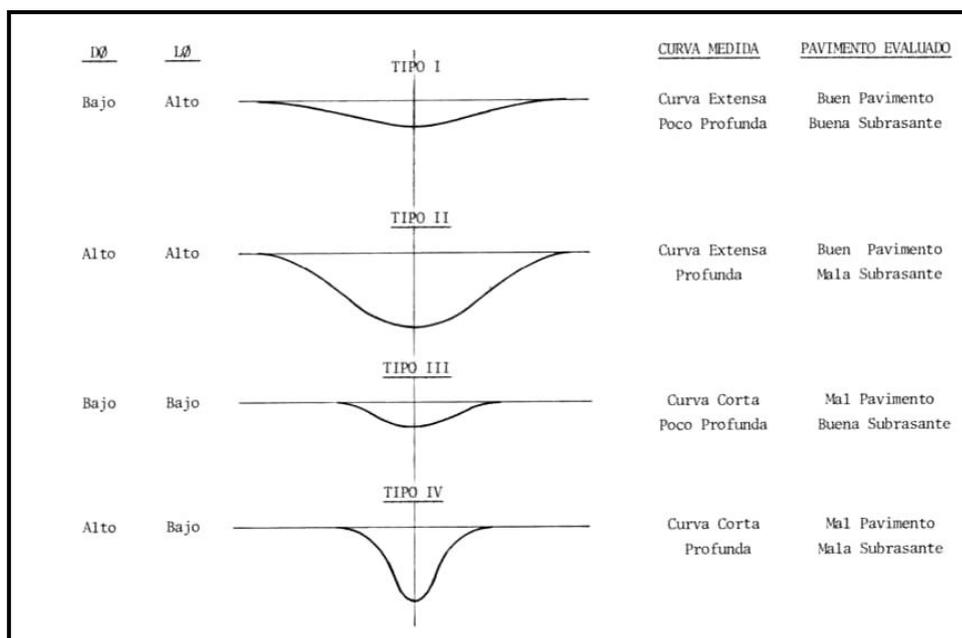


Gráfico 3: SIGNIFICADO CUALITATIVO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CURVAS DE DEFLEXIONES.

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones (S. Hoffman & M. del Aguila, 1985).

A pesar que el módulo E_0 es un parámetro mecánico fundamental del subsuelo, se ha establecido, además, una relación entre este valor y el valor del CBR de la subrasante, para facilitar el diseño del refuerzo requerido o para chequear diseños usando métodos tradicionales. Esta relación ha sido establecida experimentalmente,

comparando los valores de E_0 obtenidos de la metodología de la evaluación estructural, usando deflexiones medidas con la Viga Benkelman y valores de CBR obtenidos en sitio.

De numerosas comparaciones de este tipo se ha podido establecer la siguiente relación:

$$E_0 = (100 \text{ a } 160) * CBR$$

Fórmula 9: RELACIÓN MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA SUBRASANTE CON EL CBR.

NOTA: Para E_0 expresando en KG/cm² y CBR en porcentaje.

Resulta interesante notar que esta relación es similar a la obtenida por Heukelom y Klomp, durante ensayos de propagación de ondas vibratorias realizadas en Holanda para determinar lo que denominaron el “E dinámico” de los suelos.

El coeficiente numérico (100 A 160) de la fórmula 9 se denomina “Factor de CBR” y se recomienda utilizar un factor de 100 a 110 para ensayos rutinarios a menos que exista alguna razón que justifique su cambio.

2.1.5.8.3 SIGNIFICADO DE E^* Y HC

El valor E^* representa un módulo de elasticidad compuesto o equivalente de todas las capas del pavimento con un espesor “HC”. El espesor “HC” usado influye en el valor de E^* de manera que cuanto menos es el valor de “HC”, mayor es el valor de E^* obtenido.

Los valores HC y E^* están interconectados y son, en cierta medida, intercambiables. Para ilustrar este concepto es conveniente pensar en términos de diseño: para una subrasante y tráfico dados, el ingeniero diseñador puede optar por un espesor pequeño de excelentes materiales (Bajo HC y alto E^*) o un espesor grande de materiales mediocres (Alto HC y bajo E^*). En ambos casos el ingeniero trata de proteger a la subrasante contra esfuerzos excesivos y cuenta para esto con varias combinaciones de HC y E^* (los extremos serían un pavimento rígido vs un pavimento flexible).

En base a consideraciones de diseño y a la teoría de capas elásticas. Hoffman (1977), ha establecido que un pavimento flexible, adecuadamente diseñado, debe guardar una relación modular EP/E_0 entre 2 y 4, pudiéndose usar para fines prácticos la relación:

$$EP = 3E_0$$

Fórmula 10: RELACIÓN MODULAR.

En base al concepto de rigidez flexionante, se plantea que si el pavimento evaluado con módulo de elasticidad E^* y espesor HC es equivalente a un pavimento nuevo con

módulo EP y espesor Heq, se debe guardar la siguiente relación entre la rigidez flexionante del pavimento evaluado y del pavimento nuevo:

$$E^*(HC)^3 = EP(Heq)^3$$

Fórmula 11: RELACIÓN RIGIDEZ FLEXIONANTE DEL PAVIMENTO EVALUADO Y EL PAVIMENTO NUEVO.

Introduciendo la fórmula 10 en la fórmula 11 se obtiene que:

$$E^*(HC)^3 = 3 E_0 (Heq)^3$$

Fórmula 12: CRÉDITO ESTRUCTURAL.

$$\frac{Heq}{HC} = (1/3 E^*/E_0)^{\frac{1}{3}}$$

Fórmula 13: CRÉDITO ESTRUCTURAL MODIFICADO.

La fórmula 13 constituye la base para asignar un crédito estructural al pavimento existente con módulo E* y espesor HC desde el punto de vista del diseño. Por ejemplo, si un pavimento evaluado tiene una relación modular E*/E0 de 3, su HC es totalmente utilizable desde el punto de vista estructural (Heq/HC)=1. En cambio, si la relación modular evaluada es 2, sólo un 87% del HC cuenta como espesor estructural utilizable. Por el contrario, si la relación modular evaluada es 5, el espesor estructuralmente utilizable es igual a 118% del HC dando así crédito al buen módulo E* evaluado en el pavimento existente. El espesor Heq puede considerarse entonces como el espesor efectivo en términos de "base granular" del pavimento existente de acuerdo a los valores de HC, E* y E0 evaluados.

El siguiente paso consiste en la comparación entre este espesor efectivo y el espesor requerido para una demanda anticipada de tráfico, para establecer las necesidades de esfuerzo estructural:

$$DH = HD - Heq$$

Fórmula 14: ESPESOR DE REFUERZO.

Donde:

DH= espesor del refuerzo de material granular.

HD= espesor requerido de diseño.

Heq= espesor efectivo del pavimento existente.

2.1.6 REGULARIDAD

La regularidad es una distorsión de la superficie del pavimento que trae como consecuencia una transpirabilidad indeseable, insegura y/o anti económica.

Se define como las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan adversamente a la calidad de rodado, seguridad y costos de manutención y operación del vehículo. La regularidad tiene el mayor efecto en la evaluación de los usuarios que califican la calidad de rodado (PUC - CHILE, 1995, pág. 01).

La regularidad de un pavimento es el parámetro que relaciona la magnitud y frecuencia de sus irregularidades superficiales o altimétricas, con la comodidad o confort al transitar sobre él. Contrariamente a la percepción general, la regularidad no tiene relación con la textura, apariencia o acabado superficial de la capa de rodadura, sino más bien con las deformaciones que inciden en su perfil topográfico, como son las ondulaciones, los hundimientos, los ahuellamientos y los baches. Los fisuramientos tienen poca o ninguna incidencia en los resultados de regularidad (Vivar R., 1998).

La American Society for Testing and Materials (ASTM E867) define a la regularidad como las desviaciones de una superficie de pavimento desde una superficie plana verdadera con características que afectan la dinámica del vehículo, calidad de viaje, cargas dinámicas y drenaje, por ejemplo el perfil longitudinal y perfil transversal.

2.1.6.1 ANTECEDENTES

Durante décadas, la regularidad o regularidad superficial se ha medido recorriendo la carretera con un vehículo provisto de una rueda de medida. El equipo del Departamento de Carreteras (RDT²) de U.S.A. desarrolló esta idea en 1941 en un equipo llamado “Rugosímetro” (Roughmeter) que fue el primer intento de normalización de un vehículo de medida. El “Rugosímetro” consta esencialmente de una rueda de coche con un muelle y un amortiguador asociados (modelo de cuarto de carro). El desplazamiento del neumático respecto a la llanta se registra como el movimiento vertical y es acumulado por un integrador.

El índice de regularidad establecido fue la sumatoria en valor absoluto de los desplazamientos verticales para un intervalo de distancia dividido por la longitud del intervalo. (Crespo del Río, 1997, pág. 24)

Al final de los 70, el programa de investigación “National Cooperative Highway Research Program” (NCHRP)³ en U.S.A., se estableció un método de calibración de los equipos de medida mediante un modelo de cuarto de carro de referencia estandarizada (Golden Quarter Car⁴).

El desplazamiento acumulado dividido por la distancia recorrida del cuarto de carro normalizado a 80 Km/h define el ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI).

En 1982, el Banco Mundial, llevó a cabo en Brasil un experimento internacional denominado “The International Road Roughness experiment; Establishing Correlation

² Roads Department Team.

³ Programa Cooperativo de Investigación de la Carretera Nacional.

⁴ Cuarto de carro normalizado.

and a Calibration Standard for Measurements⁵” cuyos resultados publicó en 1986, con el objetivo principal de establecer un parámetro único de medición de la regularidad, al que denominó IRI por sus siglas en inglés (International Roughness Index); y con el objetivo adicional de agrupar los sistemas de medición de regularidad.

En el Perú, se han efectuado mediciones de la regularidad con perfilómetros estáticos tipo Merlin y perfilómetros dinámicos tipo Bump Integrator⁶.

Según (M. del Aguila, 1999) “La introducción del rugosímetro Merlin en el Perú se dio en el año 1993”, tres años después que fuera dado a conocer por el Laboratorio Británico de Investigación de Caminos y Transportes (TRRL) en el marco del primer programa de rehabilitación de carreteras financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

2.1.7 MODELOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA REGULARIDAD (RUGOSIDAD):

La regularidad (rugosidad) es la medida de la calidad de manejo percibida por el usuario. La regularidad (rugosidad) es afectada significativamente por ahuellamiento, variación de las profundidades de huellas, y agrietamiento por fatiga. La regularidad (rugosidad) del pavimento inicial (recientemente construido).

Es un indicador de la regularidad (rugosidad) futura, ya que indica la calidad total de la construcción del pavimento así como la velocidad de deterioro de la regularidad (rugosidad) con el tiempo. Diversos investigadores han propuesto distintas listas de factores que afectan la regularidad (rugosidad). Ellos incluyen la regularidad (rugosidad) inicial, ESAL, la edad, espesor de la base, índice de congelamiento, Índice de Rugosidad Internacional (IRI), tipo de sub rasante, espesor total, temperaturas máximas y mínimas y cantidad anual de días húmedos. Estos investigadores también han listado varios tipos de fallas que afectan la regularidad (rugosidad). Donde se incluye profundidad de huellas, baches, hinchamientos y depresiones, grietas transversales, desviación estándar o varianza de la profundidad de huella, parchado y agrietamiento por fatiga.

2.1.8 EL RUGOSÍMETRO MERLIN

El rugosímetro MERLIN, es un instrumento versátil, sencillo y económico, pensado especialmente para uso en países en vías de desarrollo. Fue introducido en el Perú por iniciativa personal del autor en 1993 (8), existiendo en la fecha (Junio 1999) más de 15 unidades pertenecientes a otras tantas empresas constructoras y consultoras.

⁵ El Experimento de Rugosidad Internacional de Caminos; Estableciendo una Correlación y una Calibración Estándar para las Mediciones.

⁶ Conocido como de Respuesta, consta de 3 partes: remolque, sensor y un monitor.

El MERLIN es un equipo de diseño simple. La Figura N° 3 presenta un esquema ilustrativo del instrumento. Consta de un marco formado por dos elementos verticales y uno horizontal. Para facilidad de desplazamiento y operación el elemento vertical delantero es una rueda, mientras que el trasero tiene adosados lateralmente dos soportes inclinados, uno en el lado derecho para fijar el equipo sobre el suelo durante los ensayos y otro en el lado izquierdo para descansar el equipo. El elemento horizontal se proyecta, hacia la parte trasera, con 2 manijas que permiten levantar y movilizar el equipo, haciéndolo rodar sobre la rueda en forma similar a una carretilla (Del Aguila Rodriguez, 1999, pág. 06).

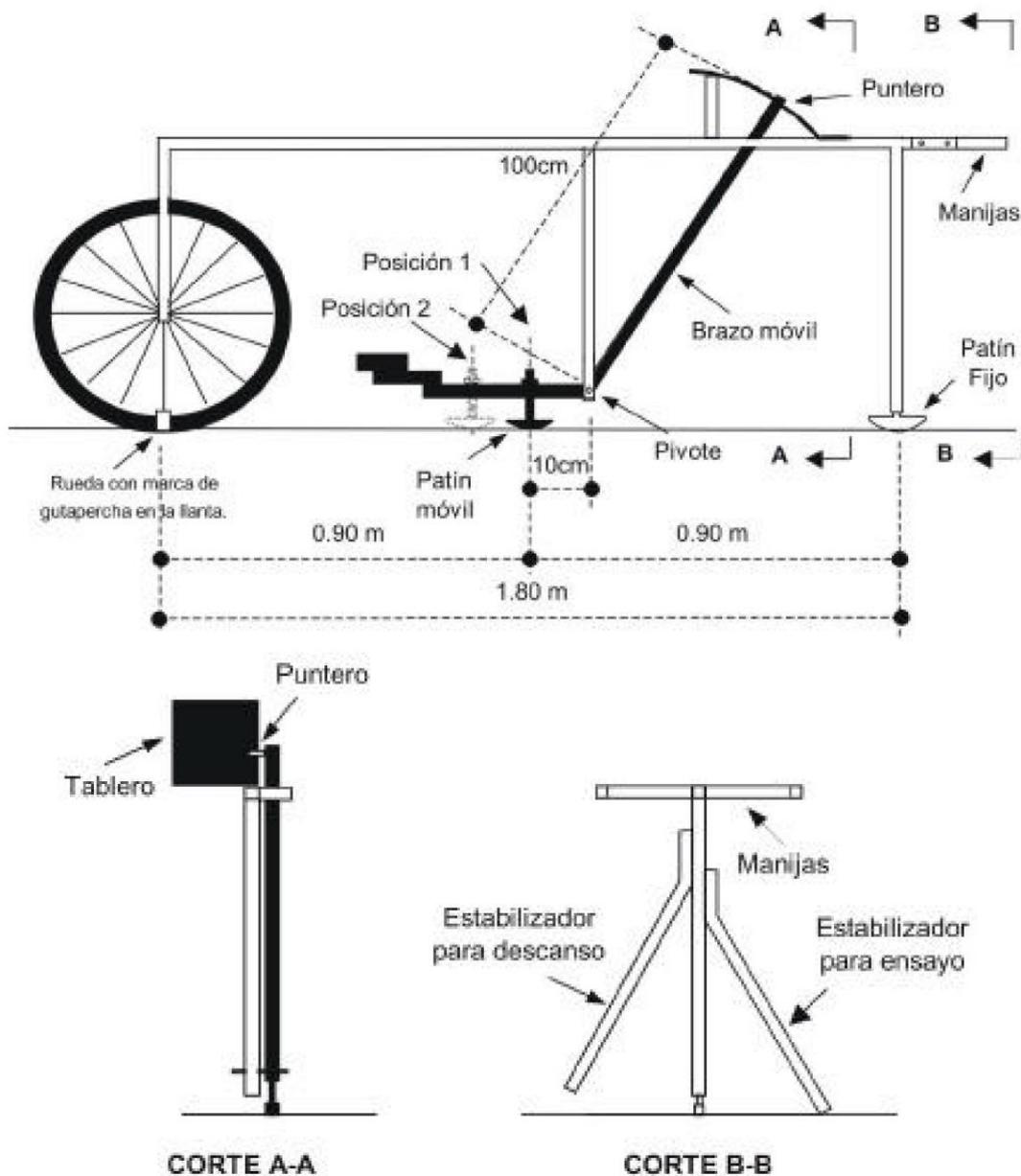


Gráfico 4: ESQUEMA DEL RUGOSÍMETRO DE MERLIN.

Fuente: Metodología para la Determinación de Rugosidad de los Pavimentos (Del Aguila Rodriguez, 1999).

2.1.8.1 ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL

La unidad de medición de regularidad que se emplea es el IRI, acrónimo para International Roughness Index (índice de Regularidad internacional), parámetro desarrollado por el Banco Mundial durante el International Road Roughness Experiment⁷ para definir la regularidad de un pavimento, trabajo llevado a cabo en Brasil en 1982, como respuesta a la proliferación de instrumentos de medición de la regularidad y a las dificultades cada vez crecientes por correlacionar sus resultados.

El IRI es un indicador estadístico de la irregularidad superficial del pavimento de una vía. El perfil real de una vía recién construida representa un estado definido por su IRI inicial; una vez puesta en servicio, la regularidad del pavimento se modifica lentamente en función del paso del tránsito, evolucionando hacia valores más elevados del IRI. (PUC - CHILE, 1995, pág. 02).

El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie del camino de una huella, representando las vibraciones inducidas por la regularidad de la vía; está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas (RARS₈₀, Reference Average Rectified Slope, razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida) producto de la simulación del modelo del cuarto de carro, (RQCS, Reference Quarter Car Simulation). Es calculado a partir de la superficie medida mediante un levantamiento topográfico o perfilometría (D. Gillespie & O. Paterson , 1986, pág. 04).

El IRI, también llamado por su nombre técnico RARS₈₀⁸, debe cumplir con las siguientes cinco condiciones (Solminihac, 2006):

- Es calculado a partir de un solo perfil. El intervalo de muestreo del perfil debería ser menor a 300 mm para cálculos precisos. La resolución requerida depende del nivel de regularidad, necesitándose resoluciones más finas para pavimentos más lisos. Una resolución de 0.5 mm en la obtención del perfil es apropiada para todas las condiciones.
- Se asume que el perfil tiene una pendiente constante entre puntos contiguos de elevación.
- El perfil es primero suavizado mediante el uso de medias móviles cuyo largo base es de 250 mm. Esto es realizado por dos motivos; la idea es simular el

⁷ El Experimento de Rugosidad Internacional de Caminos.

⁸ Reference Average Rectified Slope - Referencia Pendiente Media Rectificada.

comportamiento de la envolvente de los neumáticos y reducir la sensibilidad de la simulación del cuarto de carro al espaciamiento de muestreo del perfil longitudinal.

- El perfil suavizado es filtrado utilizando la simulación del cuarto de carro, RQCS (Reference Quarter Car Simulation- Referencia al Cuarto de Carro), con sus parámetros específicos.
- El movimiento de la suspensión simulada es acumulada y dividida por el largo del perfil para así obtener el valor de IRI; es de esta forma que el IRI es expresado generalmente en unidades m/km.

Para filtrar el perfil longitudinal y luego calcular el IRI se utiliza el modelo del cuarto de carro, el cual es un modelo matemático que consiste en una simulación de un cuarto de vehículo de referencia estandarizado, incluyendo una rueda, dos masas (carrocería del modelo, rueda y eje), resorte y amortiguador, que representa aparentemente el neumático izquierdo del eje anterior (Ver gráfico 5). Es un sistema simplificado que consta de una masa suspendida (la masa de un cuarto de carro “ideal”), conectada a una masa “no suspendida” (el eje y el neumático) a través un muelle y un amortiguador lineal (la suspensión); el neumático se representa como otro muelle lineal. Las ecuaciones dinámicas de estos elementos forman un sistema de ecuaciones que utilizan como dato de entrada el perfil de la carretera (en la parte inferior del “muelle del neumático”). El movimiento vertical de eje respecto a la masa suspendida se calcula y acumula.

Esta simulación de cuarto de carro muestra una representación teórica de los sistemas tipo respuesta en uso en el momento en que fue desarrollado el IRI, con las propiedades del vehículo ajustados para obtener una correlación máxima al rendimiento de aquellos sistemas. Las consideraciones en su diseño fueron descritos en el Reporte 228 de la *National Cooperative Highway Research Program*⁹ (NCHRP). El modelo fue llamado “The Golden Car”.

El índice normalizado IRI es la sumatoria en valor absoluto de los desplazamientos verticales para un intervalo de distancia dividido por la longitud del hilo; así el valor m/km (metros verticales acumulados por la suspensión por kilómetro viajado) es la medida final de la regularidad.

El IRI es un indicador de la condición general del pavimento.

⁹ Programa Cooperativo de Investigación de la Carretera Nacional.

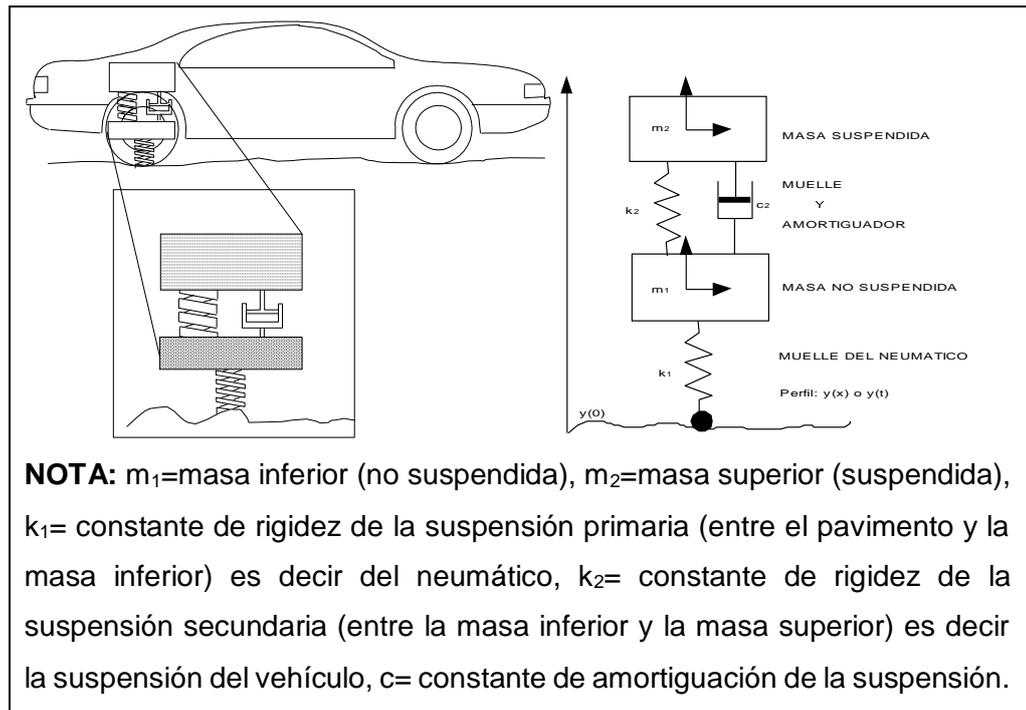


Gráfico 5: MODELO DE CUARTO DE CARRO.

Fuente: Pontificia Universidad Católica de Chile - Revista de la Construcción – Volumen Nº 5 Diciembre.

Las consideraciones más importantes sobre el IRI son:

- Su principal ventaja reside en que el IRI es un modelo matemático cuyo resultado es independiente de la técnica o equipo con el que se haya obtenido el perfil.
- Para el cálculo del IRI es importante considerar la representatividad de las ordenadas que se introducen, es decir, la confiabilidad de la técnica o equipo con el que se obtiene el perfil y la frecuencia del muestreo del mismo.
- La precisión de los equipos de medida de la irregularidad superficial es uno de los temas más delicados y complejos de decidir y valorar.

El IRI es reproducible, portátil y estable con el tiempo por ser el primer índice de perfil ampliamente usado donde el método de análisis es requerido para trabajar en diferentes tipos de rugosímetro. Las ecuaciones de análisis fueron desarrolladas y probadas para minimizar los efectos de algunos parámetros de medida tal como es el intervalo de muestra (Sayers & Karamihas, 1998, pág. 49).

La escala IRI es linealmente proporcional a la regularidad, si a todos los valores de elevación en un perfil medido son incrementados por algún porcentaje, entonces el IRI aumenta exactamente en el mismo porcentaje. Un IRI de 0.0 significa que el perfil es absolutamente liso. No existe un límite teórico superior para la regularidad, aunque los pavimentos con valores de IRI mayores a 8 m/km son casi intransitables excepto a velocidades reducidas.

2.1.8.2 ESCALA DE REGULARIDAD

En la siguiente tabla se muestra los diferentes valores del IRI (m/km) utilizados por algunos países para clasificar el grado de confort de las vías pavimentadas (Ventura J., 2005).

Tabla 10: COMPARACIÓN DE VALORES IRI UTILIZADOS EN OTROS PAÍSES.

País	Estado del pavimento		
	Bueno	Regular	Malo
EE. UU.	< 2.4	2.4 – 4.7	> 4.7
Chile	0 – 3.0	3.0 – 4.0	> 4.0
Honduras	< 3.5	3.5 – 6.0	> 6
Uruguay	< 3.9	4.0 – 4.6	> 4.6
Perú	< 2.5	2.5 - 4.5	>4.5

Fuente: DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) (Ventura J., 2005).

El documento técnico N°46 del Banco Mundial muestra la escala de regularidad para diferentes tipos de carreteras.

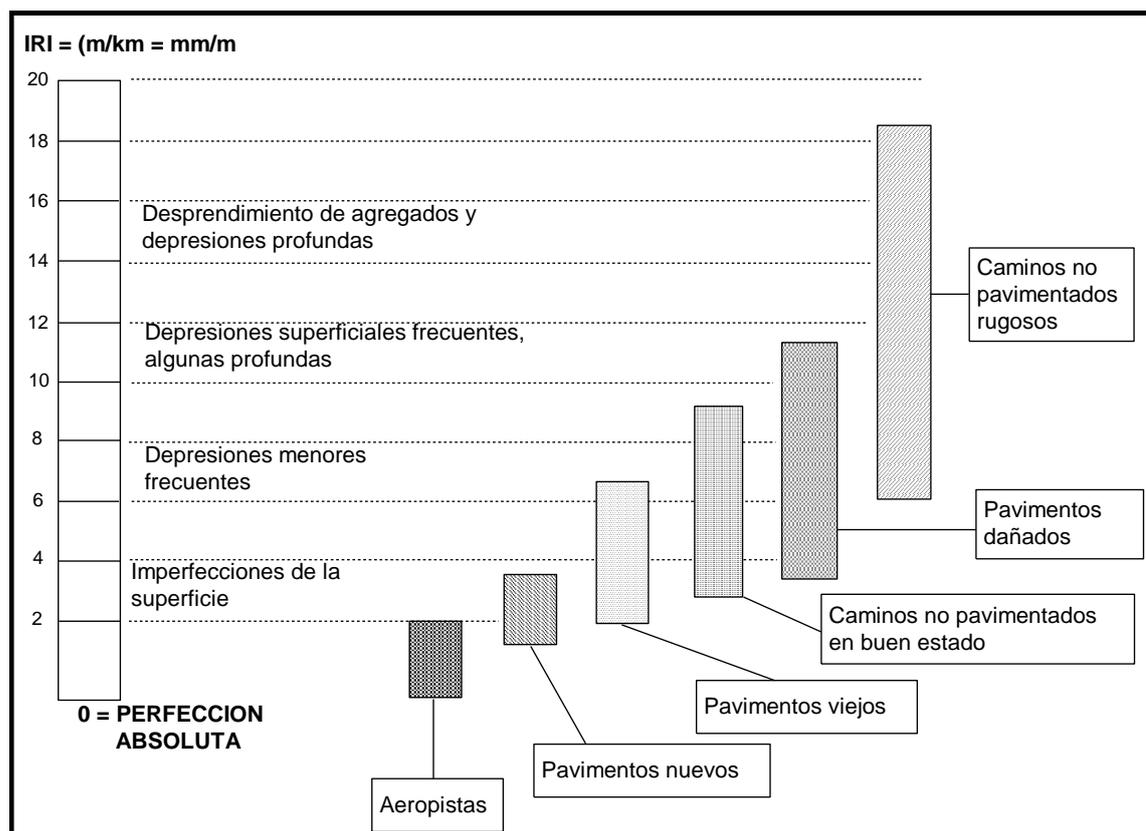


Gráfico 6: ESCALA ESTÁNDAR EMPLEADA POR EL BANCO MUNDIAL PARA CUANTIFICAR EL IRI.

Fuente: Documento técnico N° 46 del Banco Mundial.

Para el caso del Perú, la experiencia ganada entre 1993 y 1998, luego de la evaluación de más de 3,000 km de pavimentos, en más de 100 proyectos de carreteras, hizo posible establecer gracias a (M. del Aguila, 1999) “una metodología para la

determinación de la rugosidad de los pavimentos”, complementándose esto con la inclusión de criterios de análisis y especificaciones técnicas para la calificación de los resultados.

Las recomendaciones de regularidad actuales están dadas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones a través de las “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción de Carreteras” (EG-2013), en el inciso 418.15 (c)(3) que indica “Se entenderá que la superficie del pavimento tiene una rugosidad aceptable, si el promedio por km o fracción tienen un valor de IRI igual o inferior a 2,5 m/km, salvo que la especificación particular establezca un límite diferente”.

Asimismo el Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”, sección suelos y pavimentos; en donde nos indica “Para la rugosidad inicial de un pavimento nuevo y de un pavimento existente reforzado, asimismo para la rugosidad durante el periodo de servicio, se recomienda los siguientes valores”:

Tabla 11: RUGOSIDAD INICIAL IRI (M/KM) SEGÚN TIPO DE CARRETERA CON CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE

TIPO DE CARRETERA	RUGOSIDAD CARACTERÍSTICA INICIAL PAVIMENTO NUEVO IRI (m/km)	RUGOSIDAD CARACTERÍSTICA INICIAL PAVIMENTO REFORZADO IRI (m/km)	RUGOSIDAD CARACTERÍSTICA DURANTE EL PERIODO DE SERVICIO IRI (m/km)	OBSERVACIÓN
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	2.00	2.50	3.50	Rugosidad 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.	2.00	2.5	3.50	Rugosidad característica, para una confiabilidad de 95%.
Carreteras de primera clase: carreteras con un IMDA entre 4000- 2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	2.50	3.00	4.00	Rugosidad característica, para una confiabilidad de 95%.
Carreteras de segunda clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	2.5	3.00	4.00	Rugosidad característica, para una confiabilidad de 90%.
Carreteras de tercera clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	3.00	3.50	4.50	Rugosidad característica, para una confiabilidad de 90%.
Carreteras de bajo volumen de tránsito: carreteras con un IMDA ≤ 200 veh/día, de una calzada.	3.00	3.50	4.50	Rugosidad característica, para una confiabilidad de 85%.

Fuente: Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” – 2013 - MTC.

2.1.8.3 CAUSAS DE LA REGULARIDAD

La regularidad como parte de las fallas superficiales o funcionales está asociada a las condiciones de viabilidad de la capa asfáltica de rodamiento a pesar que su capacidad estructural sea adecuada para las sollicitaciones impuestas por las condiciones de servicio.

La generalidad de estas fallas se concentran en deficiencias en la capa asfáltica de rodamiento, ya sea por falla en el proceso constructivo, inadecuada dosificación, materiales inapropiados, el deterioro natural producto de los años de servicio y conservación deficiente.

Los deslizamientos de la mezcla asfáltica se deben a una deficiente adherencia con la capa subyacente. En este sentido, el exceso de asfalto en algunos riegos de liga es contraproducente puesto que además de afectar la adherencia que se procura con la capa de base, puede deteriorar la propia estabilidad de la mezcla que se coloca por encima, por incorporación de aquel e inclusive llegar a aflorar a la superficie.

El desgaste ondulatorio de la superficie, equivale al encalaminado de los caminos afirmados, es originado por los esfuerzos horizontales y deslizamientos que se producen entre llanta y pavimento ya sea debido a un resalto en el perfil longitudinal o bien por la oscilación de las ruedas con su frecuencia propia sobre una carretera de perfil aleatorio. Dichos esfuerzos y deslizamientos se suceden en los mismos lugares, cuando los vehículos circulan a velocidades próximas y poseen similares características de suspensión.

Las causas posibles de problemas en la regularidad son (Vivar R., 1998):

- Variaciones en la superficie de la base o superficie existente sobre la que se construye la nueva capa de desgaste. Aunque la esparcidora puede colocar una superficie suave, las secciones más gruesas de la carpeta asfáltica se compactarán más que las delgadas, dando como resultado una superficie final desigual.
- No verificar la superficie asfáltica con la regla inmediatamente después del rodillado inicial para realizar las correcciones mientras la superficie asfáltica todavía está caliente.
- Paradas y reinicios frecuentes de la esparcidora. Si no se puede evitar una parada, se debe verificar con una regla antes y después de la compactación.
- Juntas de construcción de mala calidad. Se deben verificar las juntas con una regla inmediatamente después de su construcción y corregirlas de ser necesario cuando el material está aún caliente.
- Rastrillado excesivo del material colocado. La regla de la esparcidora debe estar ajustada de modo que se haga innecesario el rastrillado. Las cuadrillas de

pavimentación a veces rastrillan innecesariamente para aparentar que están ocupadas.

- Rodillado irregular o dejar que el rodillo se detenga sobre el pavimento caliente.
- Mezcla no uniforme.
- Operaciones impropias de los camiones, frenos muy duros o el camión golpea a la pavimentadora.
- Temperatura no uniforme del material. Las cargas frías no se compactan al mismo espesor que las calientes. Se corrige verificando la temperatura del material antes de vaciarlo.
- Ajustes frecuentes a los controles de la regla pavimentadora.

2.1.9 METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE DETERIOROS EN PAVIMENTOS

2.1.9.1 ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO (PCI)

El índice de condición del pavimento (PCI por sus siglas en inglés) se constituye en la metodología más completa para la evaluación y calificación objetiva de pavimentos, flexibles y rígidos, dentro de los modelos de gestión vial disponibles en la actualidad.

La metodología es de fácil implementación y no requiere de herramientas especializadas: el procedimiento es enteramente manual y suministra información confiable sobre las fallas que presenta el pavimento, su severidad y el área afectada. El procedimiento ofrece buena repetibilidad y confiabilidad estadística de los resultados y el mismo fue originalmente desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos y presentado en el año 1978 por los ingenieros M.Y. Shahin y S.D Khon en el reporte N° M-268. Dicha metodología fue revisada, traducida y adaptada para Venezuela por el Ing. Augusto Jugo B. en el año 1987. Del mismo modo, el ingeniero Luis Vásquez de Colombia presentó su versión en el año 2002.

En líneas generales el procedimiento consiste en dividir la vía en estudio en secciones o “unidades de muestreo”, cuyas dimensiones varían de acuerdo con los tipos de vía y de capa de rodamiento, así por ejemplo en el caso de carreteras con capa de rodamiento asfáltica y ancho menor de 7.30 m. se tiene que el área de la unidad de muestreo debe estar en el rango entre $230.0 \pm 93.0 \text{ m}^2$.

Nota: En Venezuela, como producto de una investigación dirigida por el Ing. Augusto Jugo, PhD, en la Universidad Metropolitana, en la que demostró que el error por reducir el tamaño del área de muestreo hasta 100 m², es despreciable, se emplea con mucha frecuencia este tamaño de área.

Tabla 12: LONGITUDES DE UNIDADES DE MUESTREO ASFÁLTICAS (EJEMPLO).

ANCHO DE CALZADA (m)	LONGITUD DE LA UNIDAD DE MUESTREO (m)
5.0	46.0
5.5	41.8
6.0	38.3
6.5	35.4
7.3 (máximo)	31.5

Fuente: Manual de Evaluación de Pavimentos (Corros B., Urbáez P., & Corredor M., 2009).

Según (Corros B., Urbáez P., & Corredor M., 2009, pág. 89) En la “Evaluación de un Proyecto” se debe inspeccionar todo el tramo en estudio; sin embargo, de no ser posible, el número mínimo de secciones de muestreo que deben evaluarse se obtiene mediante la siguiente ecuación, derivada para una confiabilidad del 95%:

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

Fórmula 15: NÚMERO MÍNIMO DE SECCIONES A MUESTREAR.

Donde:

n = Número mínimo de secciones a muestrear.

N = Número total de secciones en el tramo en estudio (área total/área de sección).

e = Error admisible en la estimación del PCI, normalmente 5%.

σ = Desviación estándar del PCI entre las secciones medidas, normalmente se asume un valor de 10%, cuando no se conoce.

Una vez que se ha determinado el número de unidades de muestra a ser inspeccionadas, calcular o determinar el intervalo de espaciamiento entre las unidades utilizando un muestreo sistemático y aleatorio. Las muestras estarán distribuidas de manera uniforme en toda la extensión de la sección a partir de la primera muestra seleccionada al azar. El intervalo de inspeccionamiento (i) entre las unidades a ser inspeccionadas se calcula a través de la siguiente fórmula, redondeando el resultado al número entero inmediato inferior.

$$i = \frac{N}{n}$$

Fórmula 16: INTERVALO DE ESPACIAMIENTO ENTRE UNIDADES A INSPECCIONAR.

Donde:

N = Número total de secciones en el tramo en estudio (área total/área de sección).

n = Número mínimo de secciones a muestrear.

2.1.9.2 PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DEL PCI

A continuación se presenta un resumen de la metodología de trabajo, la cual se esquematiza en la figura siguiente:

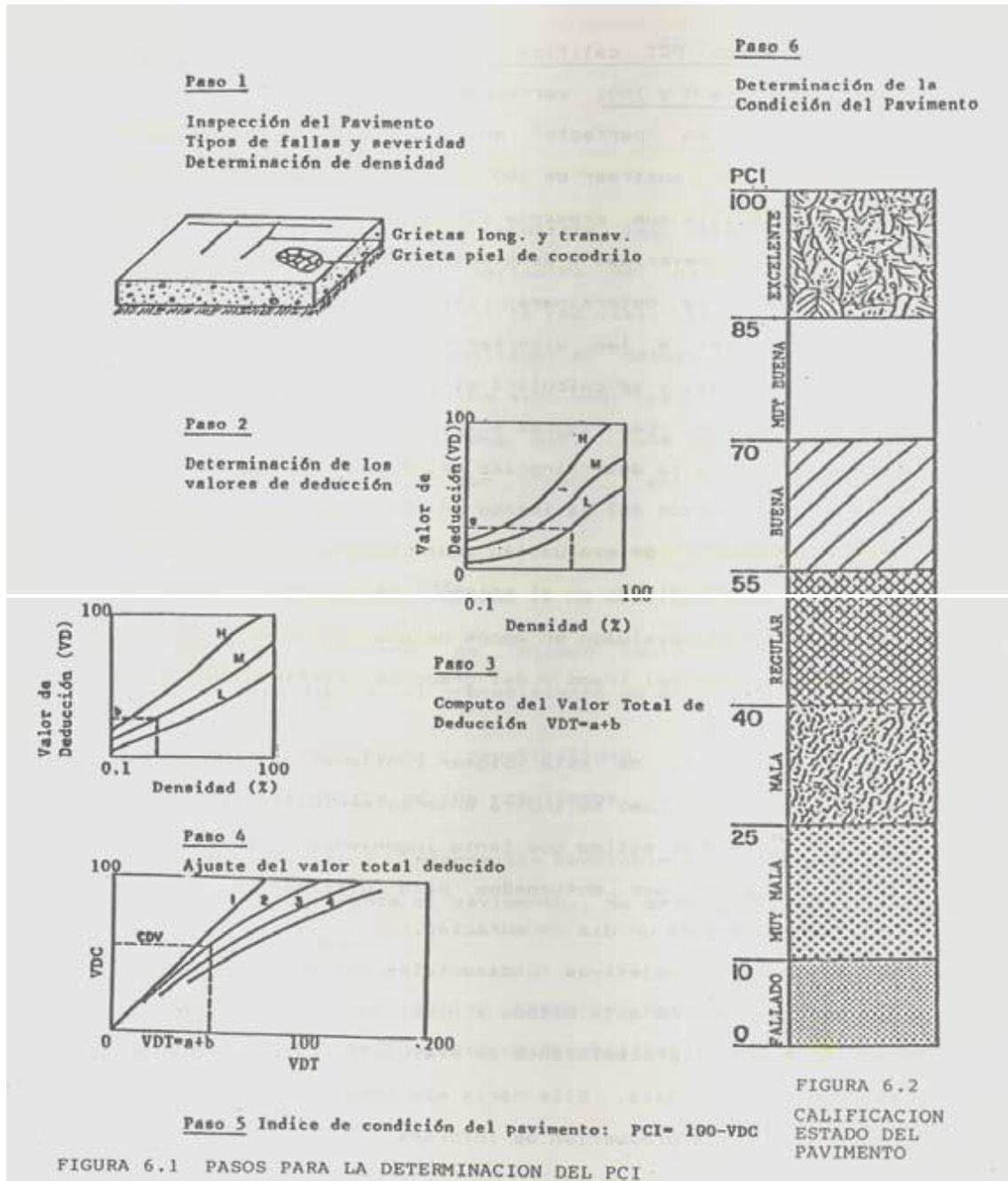


Gráfico 7: PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL PCI.

Fuente Imagen: JUGO B., A. Sistema de Gerencia de Inversiones en Pavimentos (GIP). Manual del Usuario. Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Dirección General Sectorial de Vialidad Terrestre. Caracas, Venezuela (1989).

La tabla 13 muestra las diecinueve (19) fallas consideradas por el método. Es de hacer notar que las mismas, en la versión presentada por el Ing. A. Jugo, las reduce a 14 fallas que son las que en Venezuela en la práctica, se presentan comúnmente. Del

mismo modo se destaca que la falla denominada “cruce de rieles” no ha sido considerada como tal dada su poca aparición en la actualidad en nuestro país, sin embargo, en su lugar se puede considerar la presencia de obras de drenaje, por ejemplo sumideros de reja (vialidad urbana), tal como se planteó en el capítulo referente al estudio de las fallas.

**PAVIMENTOS FLEXIBLES
MÉTODO PCI**

Tabla 13: FALLAS CONSIDERADAS.

FALLA N°	TIPO - NOMBRE	UNIDAD
1	GRIETA PIEL DE COCODRILO	m ²
2	EXUDACIÓN DE ASFALTO	m ²
3	GRIETAS DE CONTRACCIÓN (BLOQUE)	m ²
4	ELEVACIONES - HUNDIMIENTOS	m
5	CORRUGACIONES	m ²
6	DEPRESIONES	m ²
7	GRIETAS DE BORTE	m
8	GRIETAS DE REFLEXIÓN DE JUNTAS	m
9	DESNIVEL CALZADA - HOMBRILLO	m
10	GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	m
11	BACHES Y ZANJAS REPARADAS	m ²
12	AGREGADOS PULIDOS	m ²
13	HUECOS	N°
14	CRUCE DE RIELES (*)	m ²
15	AHUELLAMIENTO	m ²
16	DEFORMACIÓN POR EMPUJE	m ²
17	GRIETAS DESLIZAMIENTO	m ²
18	HINCHAMIENTO	m ²
19	DISGREGACIÓN Y DESINTEGRACIÓN	m ²

(*): Reemplazar por acceso a puentes, pontones y rejillas de drenaje.

Fuente: MÉTODO DE EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS PCI (Pavement Condition Index). Cuerpo de Ingenieros de la Armada de E.U.A. Reporte Técnico M-268 (1978) M.Y. Shahin y S.D Khon. Versión en Español por: ING. AUGUSTO JUGO B. Caracas 1987.

XXXX : FALLAS UTILIZADAS EN LA PRÁCTICA EN VENEZUELA.

100	
85	EXCELENTE
70	MUY BUENO
55	BUENO
40	REGULAR
25	MALO
10	MUY MALO
0	FALLADO

Gráfico 8: ÍNDICE PCI Y ESCALA DE GRADUACIÓN.

Fuente: Escala del PCI sugerida por ASTM D6433.

2.1.9.2.1 PASO 1: Inspección del pavimento. Determinación del número y áreas de cada sección de medición de PCI.

En Venezuela la práctica común es hacer una medición de PCI por km. La primera sección se ubica aleatoriamente, y las demás a un km. de la anterior. Uno de los mayores inconvenientes del método aleatorio es la exclusión del proceso de inspección y evaluación de algunas unidades de muestreo en muy mal estado. También puede suceder que unidades de muestreo que tienen daños que sólo se presentan una vez (por ejemplo, “cruce de línea férrea”) queden incluidas de forma inapropiada en un muestreo aleatorio. Para evitar lo anterior, durante la inspección del tramo deberá establecerse cualquier unidad de muestreo inusual y evaluarla como una “unidad adicional” en lugar de una “unidad representativa” o aleatoria.

2.1.9.2.2 PASO 2: Inspección del pavimento. Identificación del tipo de falla y medición de su severidad y magnitud.

TIPOS DE FALLAS									
1	Grieta piel de cocodrilo	M2	11	Baches y zanjas separadas	M2				
2	Exudación de asfalto	M2	12	Agregados pulidos	M3				
3	Grietas de contracción (bloques)	M2	13	Muecos	No				
4	Elevaciones-Hundimientos	M	14	Acceso a puentes	M2				
5	Corrugaciones	M2	15	Ahuellamiento	M2				
6	Depresiones	M2	16	Deformación por empuje	M2				
7	Grietas de borde	M	17	Grietas de deslizamiento	M2				
8	Bolotas de reflexión de juntas	M	18	Hinchamiento	M2				
9	Desnivel calzada-Hoehrillo	M	19	Disgregación y Desintegración	M2				
10	Grietas longitudinales y transversales	M							

TIPOS DE FALLA EXISTENTES									
TOTAL	BAJA (L)								
	MEDIA (M)								
	ALTA (H)								

CALCULO DEL PCI				
TIPO DE FALLA	DENSIDAD	SEVERIDAD	VALOR DE DEDUCCION	PCI = 100 - VDC <hr style="width: 50%; margin: auto;"/> CONDICION DEL PAVIMENTO
VALOR TOTAL DE DEDUCCION (VDT)				
VALOR DE DEDUCCION CORREGIDO (VDC)				

Gráfico 9: FORMATO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO (PCI).

Fuente Imagen: JUGO B., A. Sistema de Gerencia de Inversiones en Pavimentos (GIP). Manual del Usuario. Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Dirección General Sectorial de Vialidad Terrestre. Caracas, Venezuela (1989).

La evaluación de la condición incluye los siguientes aspectos:

a. **Equipo:**

- Odómetro manual para medir las longitudes y las áreas de los daños.
- Regla y una cinta métrica para establecer las profundidades de los ahuellamientos y depresiones.

- Manual de daños del PCI con los formatos correspondientes en cantidad suficiente para el desarrollo de la actividad. La figura muestra la planilla típica de recolección de datos ofrecida por el Método PCI.

b. Seguridad durante el trabajo:

El equipo de inspección deberá implementar todas las medidas de seguridad para su desplazamiento en la vía inspeccionada, tales como dispositivos de señalización y advertencia para el vehículo acompañante y para el personal en la vía.

c. Procedimiento:

Se inspecciona una unidad de muestreo para medir el tipo, cantidad y severidad de los daños de acuerdo con el Manual de Daños, y se registra la información en el formato correspondiente. Se deben conocer y seguir estrictamente las definiciones y procedimientos de medida los daños. Se usa un formulario u “hoja de información de exploración de la condición” para cada unidad muestreo y en los formatos cada renglón se usa para registrar un daño, su extensión y su nivel de severidad.

A continuación se presenta planilla con ejemplo ilustrativo:

TIPOS DE FALLAS							
1	Grieta piel de cocodrilo	M2	11	Baches y zanjas separadas	M2		
2	Exudación de asfalto	M2	12	Agregados pulidos	M2		
3	Grietas de contracción (bloque)	M2	13	Huecos	M2		
4	Flecciones-Hundimientos	M	14	Acceso a puentes	M2		
5	Corrugaciones	M2	15	Ahuellamiento	M2		
6	Depresiones	M2	16	Deformación por empuje	M2		
7	Grietas de borde	M	17	Grietas de deslizamiento	M2		
8	Grietas de reflexión de juntas	M	18	Hinchamiento	M2		
9	Desnivel calzada-Hombrito	M	19	Disgregación y Desintegración	M2		
10	Grietas longitudinales y transversales	M					

		TIPOS DE FALLA EXISTENTES						
		3	10	1	7	13		
	7 M		4 L	8 L	5 L	1 L		
	4 M		10 L					
	4 M		3 L					
	5 L		6 M					
			3 L					
TOTAL	BAJA (L)	5	20	8	5	1		
	MEDIA (M)	15	6					
	ALTA (H)	—	—					

Gráfico 10: EJEMPLO DE LLENADO DEL FORMATO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO (PCI).

Fuente: Manual de Evaluación de Pavimentos “Universidad Nacional de Ingeniería” – 2009.

2.1.9.2.3 PASO 3: Determinación del “valor de deducción” para cada falla medida, a partir de su severidad, densidad y del gráfico correspondiente.

2.2.9.2.3.1 Cálculo de los valores de deducción (VD):

- a) Totalice cada tipo y nivel de severidad de daño y regístrelo en la columna y/o celda del formato en uso.

El daño puede medirse en área, longitud o por número según la falla considerada.

- b) Divida la **cantidad** de clase de daño, en cada nivel de severidad, entre el **área total** de la unidad de muestreo y exprese el resultado como porcentaje.

Ésta es la **densidad** del daño, con el nivel de severidad especificado, dentro de la sección en estudio.

Para el ejemplo que venimos adelantando, estos valores se resumen en el siguiente cuadro:

Tabla 14: RESUMEN DE VALORES DEL EJEMPLO.

TIPO DE FALLA	DENSIDAD	SEVERIDAD
3	2.38	L
3	7.14	M
10	9.52	L
10	2.86	M
1	3.81	L
7	2.58	L
13	0.48	L
VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN		

Fuente: Elaboración propia.

- c) Determine el **valor de deducción** para cada tipo de daño y su nivel de severidad mediante las curvas denominadas “valor de deducción” que se adjuntan en el anexo A, de acuerdo con el tipo de falla medida.

Así, para la Falla Tipo 3 (grietas en bloque), con una densidad de 2.38% y una severidad baja, mediante el Gráfico 11, se obtiene un “valor de deducción” de 2.

FALLA 3: GRIETAS DE BLOQUE

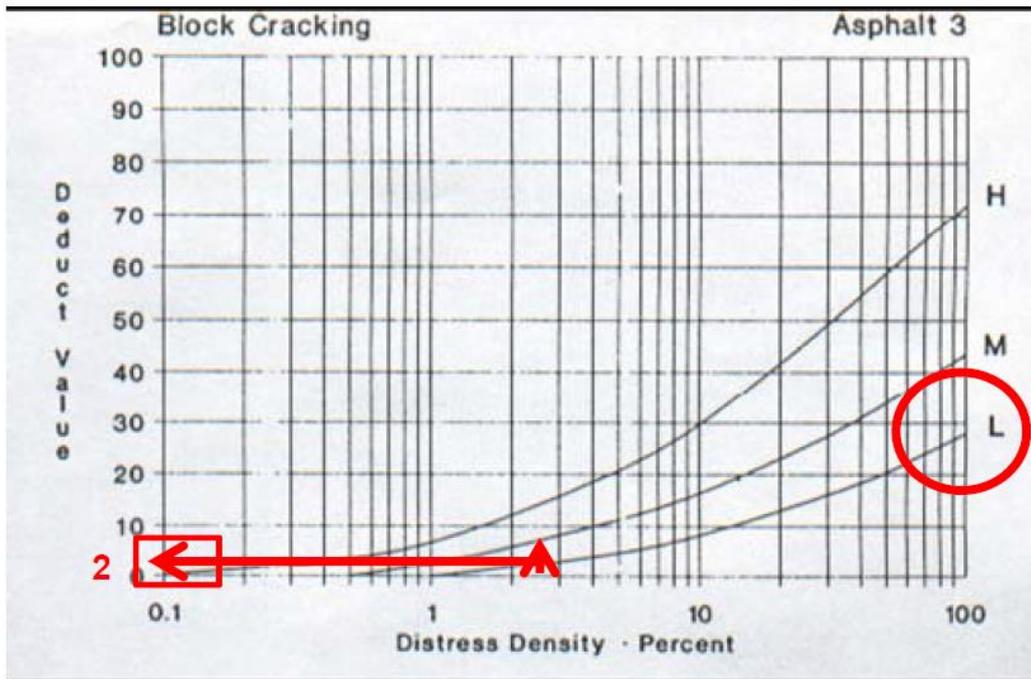


Gráfico 11: VALOR DE DEDUCCIÓN DE GRIETA DE BLOQUE.

Fuente: Manual de Evaluación de Pavimentos "Universidad Nacional de Ingeniería" – 2009.

Igualmente, empleando el mismo Gráfico 11 (grieta de bloque), pero con una densidad de 7.14%, y con una severidad media (M), se obtiene un "valor de deducción" de 14.

FALLA 3: GRIETAS DE BLOQUE (EJEMPLO).

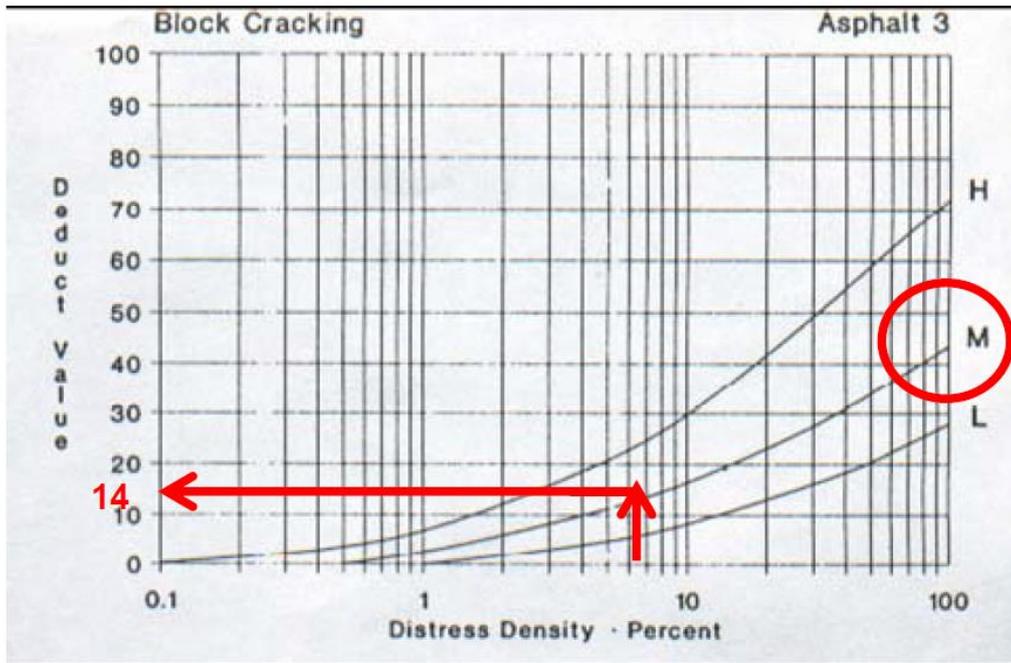


Gráfico 11: VALOR DE DEDUCCIÓN DE GRIETA DE BLOQUE.

Fuente: Manual de Evaluación de Pavimentos "Universidad Nacional de Ingeniería" – 2009.

Pasando ahora a la Falla Tipo 10 (grietas longitudinales y transversales), en el Gráfico 12, y entrando con una densidad de 9.52% y una severidad baja (L), se obtiene un “valor de deducción” de 7.

FALLA 10: GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES.

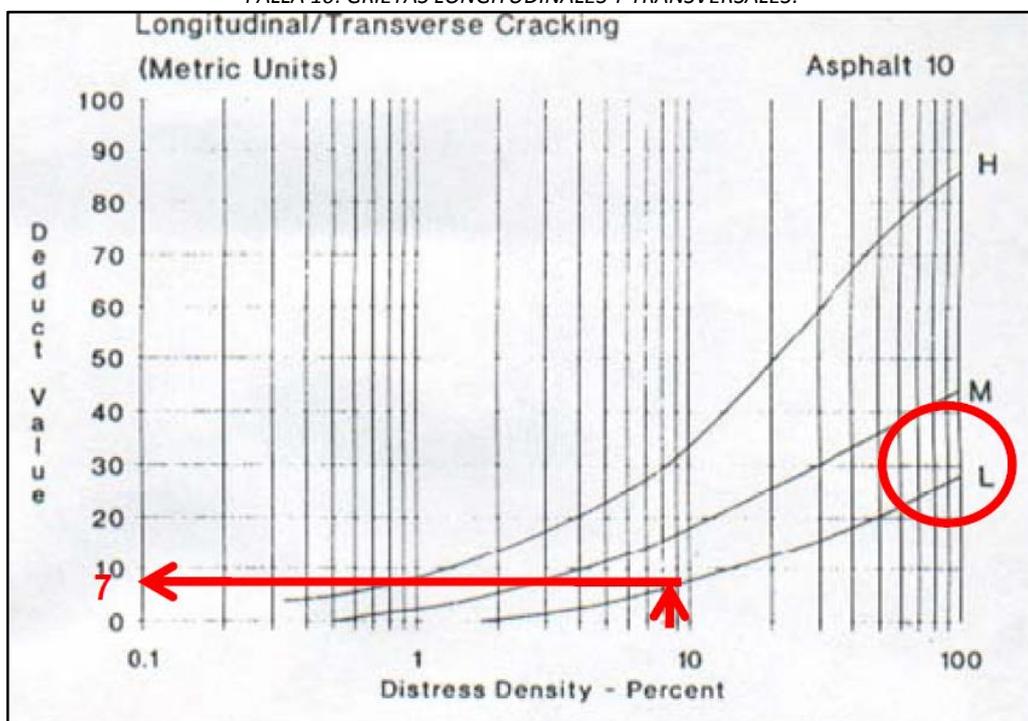


Gráfico 12: VALOR DE DEDUCCIÓN GRIETA LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL.

Fuente: Manual de Evaluación de Pavimentos “Universidad Nacional de Ingeniería” – 2009.

Continuando con este mismo procedimiento para la otra severidad de la grieta 10, y para las densidades y severidades de las Fallas 1 (piel de cocodrilo), 7 (grietas de borde) y 13 (huecos), con las gráficas correspondientes, se tiene el siguiente resumen de “valores de deducción” para el ejemplo que estamos adelantando.

Tabla 15: VALORES DE DEDUCCIÓN DEL EJEMPLO.

TIPO DE FALLA	DENSIDAD	SEVERIDAD	VALOR DE DEDUCCIÓN
3	2.38	L	2
3	7.14	M	14
10	9.52	L	7
10	2.86	M	8
1	3.81	L	22
7	2.58	L	3
13	0.48	L	12

Fuente: Elaboración Propia.

2.1.9.2.4 PASO 4: Cálculo del valor de deducción total (VDT), que es igual a la sumatoria de todos los valores de deducción de cada tipo de falla individual.

Tabla 16: VALORES DE DEDUCCIÓN TOTAL DEL EJEMPLO.

TIPO DE FALLA	DENSIDAD	SEVERIDAD	VALOR DE DEDUCCIÓN
3	2.38	L	2
3	7.14	M	14
10	9.52	L	7
10	2.86	M	8
1	3.81	L	22
7	2.58	L	3
13	0.48	L	12
VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN			68

Fuente: Elaboración propia.

En el ejemplo que estamos siguiendo este valor alcanza un valor total de 68. (VDT = 68).

2.1.9.2.5 PASO 5: Cálculo del valor de deducción corregido (VDC), en función del VDT y del número de valores de VDT que sean mayores que cinco (5) (valor “q”).

En el ejemplo q=6 porque hay seis (06) valores de deducción mayores que dos (2).

El valor de $VD > 2$ se emplea en la versión PCI de Colombia y en Venezuela se emplea el valor de $VD > 5$, muy probablemente en función del momento en que cada versión fue publicada (la versión de Colombia parece ser más reciente), y es la que seguimos en nuestro ejemplo.

2.1.9.2.6 PASO 6: Cálculo del Índice de Condición del Pavimento (PCI). Para ello se utiliza la gráfica de “valor de deducción corregida”, a la cual se accede con el VDT y se intercepta la curva con el “q” correspondiente, leyendo a la izquierda el “Valor de Deducción Corregido (VDC)”, el cual será finalmente restado a 100.

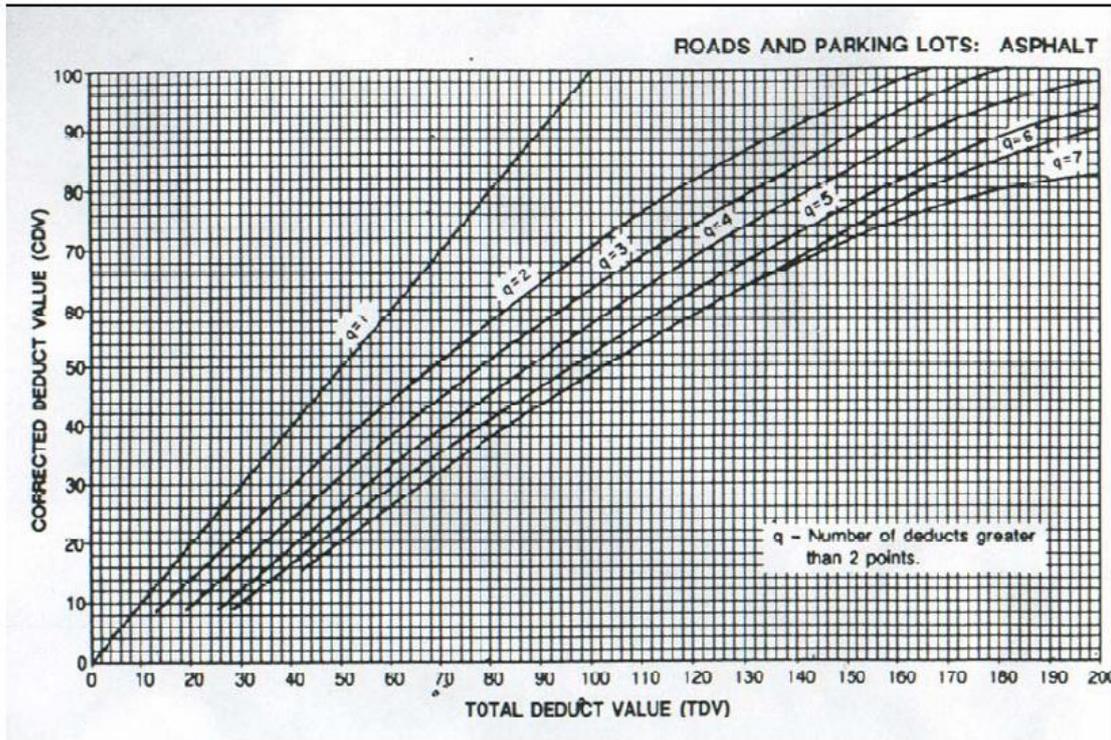


Gráfico 13: VALOR DE DEDUCCIÓN CORREGIDA.

Fuente: Manual de Evaluación de Pavimentos "Universidad Nacional de Ingeniería" – 2009.

En nuestro ejemplo:

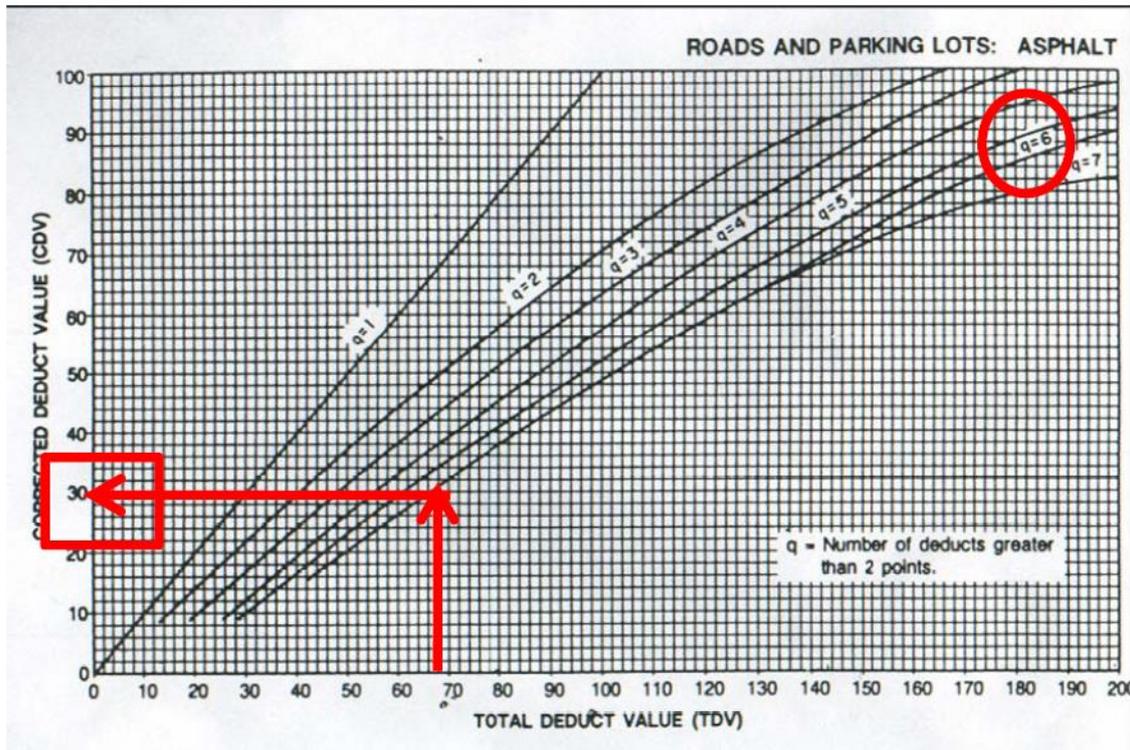


Gráfico 14: VALOR DE DEDUCCIÓN CORREGIDA (EJEMPLO).

Fuente: Manual de Evaluación de Pavimentos "Universidad Nacional de Ingeniería" – 2009.

$$PCI = 100 - VDC$$

Fórmula 17: CÁLCULO DEL PCI.

Donde:

VDC: Valor de deducción corregida.

En nuestro ejemplo, se obtiene $VDC = 30$

$$PCI = 100 - 30 = 70$$

Es decir, que la condición funcional de este pavimento es de “*buena a muy buena*” (ver gráfico 8, pág. 60).

2.2 MARCO CONCEPTUAL

- **CARPETA DE RODADURA.-** Es la capa superior de un pavimento asfáltico, llamada también capa de desgaste o capa de rodadura.
- **MUESTRA.-** Es el componente más pequeño de la red vial, cada sección es subdividida en unidades de muestra para su inspección usando técnicas estadísticas de muestreo que garantizan la representatividad de la sección.
- **NIVELES DE SERVICIO.-** Indicadores que identifican y cuantifican el estado de servicio de una vía, y que normalmente se utilizan como límites admisibles hasta los cuales pueden evolucionar su condición superficial, funcional, estructural y de seguridad. Los indicadores son propios de cada vía y varían de acuerdo a los factores técnicos y económicos dentro de un esquema general de satisfacción del usuario (comodidad oportunidad, seguridad y economía) y rentabilidad de los recursos disponibles.
- **REGULARIDAD.-** Parámetro del estado más característico de la condición funcional de la capa de superficie de rodadura de un pavimento, se expresa mediante el Índice de Regularidad Internacional (IRI).
- **RUGOSIDAD.-** Conjunto de irregularidades que presenta un pavimento en su superficie.
- **SERVICIABILIDAD.-** Habilidad de un pavimento para servir a los tipos de solicitudes (estáticas o dinámicas) para los que han sido diseñados.
- **SECCIÓN.-** Es la parte de un tramo que tiene ciertas características tales como la composición estructural y la condición del pavimento.
- **TRAMOS.-** Es una parte fácilmente identificable de una red de pavimento y se caracteriza por tener características específicas.

2.3 GLOSARIO

- **AASHTO.-** American Association of State Highway and Transportation Officials.
- **AASHTO.-** Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transportes.
- **ASTM.-** American Society for Testing and Materials.
- **BID.-** Banco Interamericano de Desarrollo.
- **CBR.-** California Bearing Ratio.
- **CBR.-** Relacion de Soporte de California.
- **ESAL.-** Número de Ejes de Carga Equivalentes.
- **FEC.-** Factor de Equivalencia de Carga.
- **IMDA.-** Índice Medio Diario Anual.
- **IRI.-** International Roughness Index.
- **IRI.-** Índice de Rugosidad Internacional.
- **IP.-** Índice Plástico.
- **MERLIN.-** Machine for Evaluating Roudhness using Low –cost Instrumentation.
- **MTC.-** Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- **NCHRP.-** National Cooperative Highway Research Program.
- **PCI.-** Pavement Condition Index.
- **PCI.-** Índice de Condición del Pavimento.
- **RQCS.-** Reference Quarter Car Simulation.
- **SUCS.-** Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
- **VD.-** Valor de Deducción.
- **VDC.-** Valor de Deducción Corregido.
- **VDT.-** Valor Total de Deducción.

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTOS PARA LA EJECUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3. PROCEDIMIENTOS PARA LA EJECUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 EVALUACIÓN DE LA VÍA

3.1.1 TRABAJO DE CAMPO

Definitivamente es un aspecto importante, el conocer los antecedentes de la vía, pues nos mostrará el cambio o evolución periódica que ha sufrido el pavimento desde su ejecución a la existente, al determinar las características de la vía.

3.1.2 INSPECCIÓN VISUAL

Dentro del trabajo de investigación se considera importante la evaluación visual de la condición en el que el pavimento se encuentra, con la recopilación de datos reales en campo, por lo que se ha efectuado la determinación detallada de todos los deterioros y fallas observadas en la carpeta de rodadura existente.

Las dificultades más grandes en este tipo de tareas son, por un lado, la forma de recoger y procesar en forma conveniente la información y por otro lado la falta de uniformidad o acuerdo en la terminología a adoptar, por ejemplo el término “falla”.

El término “falla” en sí mismo puede resultar ambiguo, en carpetas asfálticas dicho término puede emplearse tanto para verdaderos colapsos o para describir unos simples deterioros. En este sentido el problema se complica a un más si se tiene en cuenta que el concepto de deterioro o falla está asociado al nivel de serviciabilidad.

A mayor cantidad de factores a evaluar estos se traducirán posteriormente en registrar, analizar, resumir, almacenar la información recabada, procesar los datos y establecer las conclusiones correspondientes.

La evaluación del estado de la carpeta, fue realizada en forma eficaz y rápida, con el propósito de caracterizar las condiciones de la superficie de rodadura, basándose en la apreciación subjetiva del estado de la superficie y la estructura del mismo.

Teniendo en consideración estos aspectos la caracterización del estado de la superficie de la vía, se ha llevado a cabo considerando los siguientes aspectos:

- El relevamiento de las distintas manifestaciones de deterioro observadas en la superficie (identificación).
- Establecer la condición de servicio del pavimento en base a la magnitud, extensión, tipo de falla y mecanismo de deterioro, orientado hacia el futuro empleo de la información (evaluación).

El trabajo en campo consistió, primeramente en una evaluación visual de toda la zona en estudio: km 00+000 al km 39+900, para identificar y visualizar los problemas y los tipos de fallas que existen en la carretera, para luego calcular el índice de condición de pavimento, con lo cual se logró detectar los cuatro kilómetros más críticos de la vía. De lo cual se tiene:

- Primer tramo crítico comprendido entre las progresivas 06+500 al 08+500 (2 kilómetros críticos).
- Segundo tramo crítico comprendido entre las progresivas 15+400 al 17+400 (2 kilómetros críticos).
- Entre el primer y el segundo tramo se tienen en total 4 kilómetros críticos que son parte de la presente evaluación.

Se realizó el estudio de tráfico correspondiente a la vía en evaluación, para poder cuantificar el grado de esfuerzo que tuvo el pavimento, en el periodo de tiempo que estuvo de servicio, mediante el cálculo de los ejes equivalentes o ESAL.



Gráfico 15: FALLAS DE LA VÍA EN ESTUDIO KM 39+900.

De la evaluación visual se puede decir que los problemas a nivel del pavimento sí presentan fallas notorias, sobre todo en los 4 cuatro kilómetros críticos identificados mediante el método del índice de condición de pavimento (PCI), es decir, los tramos: km 06+500 al km 08+500 y km 15+400 al km 17+400, como son piel de cocodrilo, corrugaciones, depresiones, huecos, entre otras grietas en el material asfáltico.

De lo cual se determina que se hará una evaluación deflectométrica con una Viga Benkelman de 01 brazos para evaluar toda estructura del pavimento y de regularidad para evaluar el IRI de la vía.

La frecuencia de los ensayos son los siguientes:

Tabla 17: CANTIDAD, FRECUENCIAS Y NÚMERO DE ENSAYOS.

ENSAYOS EN LA VÍA	FRECUENCIA
Índice de condición de pavimento.	Km 00+000 al 39+900
Estudio de tránsito.	Años 2009 en adelante.
Evaluación deflectométrica.	160 pruebas.
Ensayo de regularidad.	4000 puntos.

3.1.3 ENSAYOS EN LA VÍA

3.1.2.1 EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO MEDIANTE EL MÉTODO DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO (PCI)

- Se determina el número y áreas de cada sección de medición de PCI.

El muestreo se llevó a cabo siguiendo el procedimiento detallado a continuación:

1. Se identificaron visualmente las áreas y secciones en el pavimento con características diferentes muy notorias a simple vista. Se ha definido como red de pavimento, a 39 900 metros lineales de pavimento que forman parte la vía Puno – Vilque – Mañazo.

Para hacer la división de secciones, se tomó en cuenta el estado en que se encontró el pavimento. Se hizo un recorrido por todo el tramo, observando la condición de la vía e identificado los cambios de estado de la pista. Así se identificaron dentro de los 39.9 kilómetros un total de 6 secciones bien marcadas como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 18: SECCIONES DEL PAVIMENTO.

DESCRIPCIÓN	EXTENSIÓN	
	DEL	AL
SECCIÓN 1	KM 00+000	KM 09+000.5
SECCIÓN 2	KM 09+000.5	KM 12+524.1
SECCIÓN 3	KM 12+524.1	KM 17+043.5
SECCIÓN 4	KM 17+043.5	KM 20+030.9
SECCIÓN 5	KM 20+030.9	KM 22+520.4
SECCIÓN 6	KM 22+520.4	KM 39+900.0

3.1.2.1.1 DIVISIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTRA:

Para poder realizar la división de las unidades de muestra se tomó en base al ancho de calzada. De esta manera se obtiene los siguientes datos:

Longitud total de la vía : 39 900 m
 Ancho de calzada : 6.0 m
 Longitud de muestra : 38.3 m

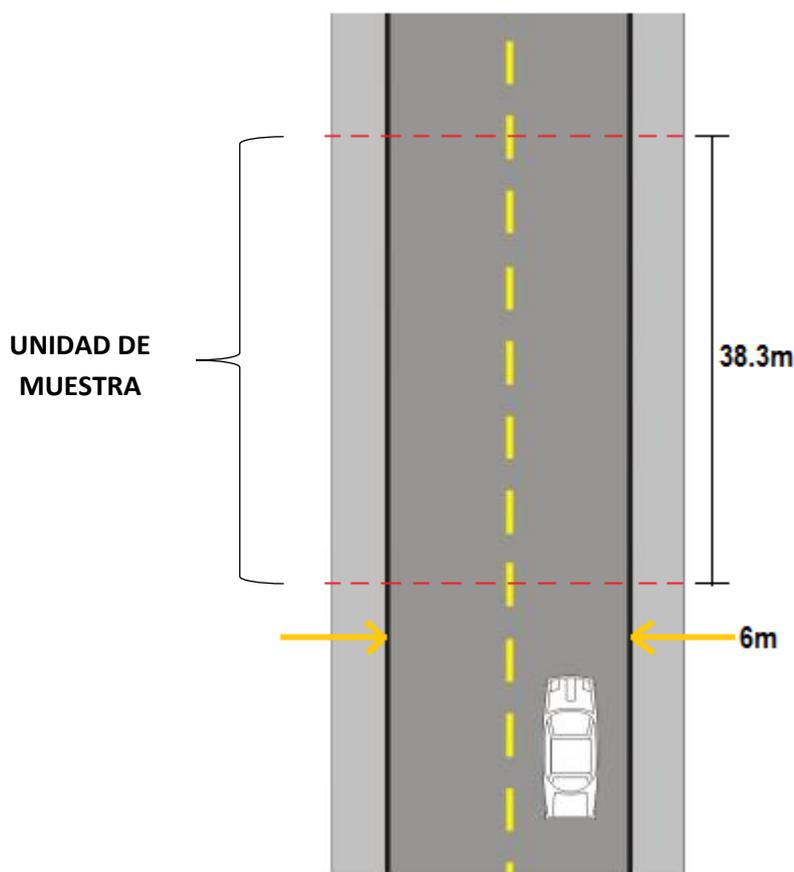


Gráfico 16: ILUSTRACIÓN DE LA UNIDAD DE MUESTRA.
 Fuente: Elaboración Propia.

Se ha adoptado una longitud de muestra de 38.3m (ver tabla 12, pág. 57), debido a que el ancho de calzada es de 6.0m. Esto da un área de 229.8m², el cual cumple con los valores sugeridos.

Para la obtención del número total de muestras, se divide la longitud total de la sección o vía entre la longitud de la muestra, si el resultado resulta ser un número decimal este deberá ser redondeado a un número entero denominado número de unidades de muestra (N). De la siguiente manera:

SECCIÓN 1:

$$N_1 = \frac{9,000.5}{38.3} = 235$$

SECCIÓN 2

$$N_2 = \frac{3,523.6}{38.3} = 92$$

SECCIÓN 3:

$$N_3 = \frac{4,519.4}{38.3} = 118$$

SECCIÓN 4:

$$N_4 = \frac{2,987.4}{38.3} = 78$$

SECCIÓN 5:

$$N_5 = \frac{2,489.5}{38.3} = 65$$

SECCIÓN 6:

$$N_6 = \frac{17,379.6}{38.3} = 453.76 \approx 454$$

Aplicando la fórmula 15, se calcula las unidades a ser evaluadas en cada sección, y se adoptó un error $e = 5\%$ y una desviación estándar de $\sigma = 10$, debido a que es la primera evaluación que se realiza, de modo que tenemos:

$$n_1 = \frac{(235 * 10^2)}{((5^2/4) * (235 - 1) + 10^2)} = 15.04 \approx 15$$

Con ello se obtuvo 235 unidades de muestreo de las cuales 15 deberán ser evaluadas.

$$n_2 = \frac{(92 * 10^2)}{((5^2/4) * (92 - 1) + 10^2)} = 13.76 \approx 14$$

Con ello se obtuvo 92 unidades de muestreo de las cuales 14 deberán ser evaluadas.

$$n_3 = \frac{(118 * 10^2)}{((5^2/4) * (118 - 1) + 10^2)} = 14.20 \approx 14$$

Con ello se obtuvo 118 unidades de muestreo de las cuales 14 deberán ser evaluadas.

$$n_4 = \frac{(78 * 10^2)}{((5^2/4) * (78 - 1) + 10^2)} = 13.42 \approx 13$$

Con ello se obtuvo 78 unidades de muestreo de las cuales 13 deberán ser evaluadas.

$$n_5 = \frac{(65 * 10^2)}{((5^2/4) * (65 - 1) + 10^2)} = 13$$

Con ello se obtuvo 65 unidades de muestreo de las cuales 13 deberán ser evaluadas.

$$n_6 = \frac{(454 * 10^2)}{((5^2/4) * (454 - 1) + 10^2)} = 15.49 \approx 16$$

Con ello se obtuvo 454 unidades de muestreo de las cuales 16 deberán ser evaluadas.

3.1.2.1.2 SELECCIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO PARA INSPECCIÓN:

Mediante la fórmula 16, se calculan las unidades de muestra a ser inspeccionadas aplicando el método aleatorio, de modo que según la fórmula 16 tenemos:

$$i_1 = \frac{N_1}{n_1} = \frac{235}{15} = 15.67$$

Por lo tanto, el intervalo de muestreo para la SECCIÓN 1 es $i_1 = 15$.

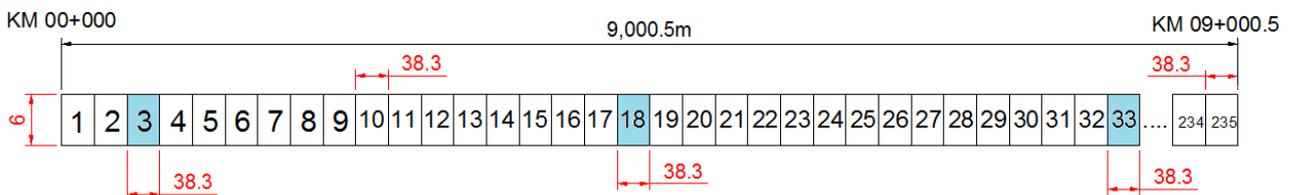


Gráfico 17: REPRESENTACIÓN DE SECCIÓN 1 E INTERVALO DE UNIDADES DE MUESTRA.

Fuente: Elaboración Propia.

En la representación gráfica se muestra las unidades de muestra de color celeste las cuales serán evaluadas para calcular el PCI.

$$i_2 = \frac{N_2}{n_2} = \frac{92}{14} = 6.57$$

Por lo tanto, el intervalo de muestreo para la SECCIÓN 2 es $i_2 = 6$

$$i_3 = \frac{N_3}{n_3} = \frac{118}{14} = 8.43$$

Por lo tanto, el intervalo de muestreo para la SECCIÓN 3 es $i_3 = 8$

$$i_4 = \frac{N_4}{n_4} = \frac{78}{13} = 6.0$$

Por lo tanto, el intervalo de muestreo para la SECCIÓN 4 es $i_4 = 6$

$$i_5 = \frac{N_5}{n_5} = \frac{65}{13} = 5.0$$

Por lo tanto, el intervalo de muestreo para la SECCIÓN 5 es $i_5 = 5$

$$i_6 = \frac{N_6}{n_6} = \frac{454}{16} = 28.38$$

Por lo tanto, el intervalo de muestreo para la SECCIÓN 6 es $i_6 = 28$

3.1.2.1.3 DETERMINACIÓN DEL PCI EN LAS SECCIONES EN ESTUDIO

Con la información de daños presentes en las unidades de muestreo seleccionadas y los grados de severidad se determinaron las áreas correspondientes de cada falla y se recopiló toda la información en el formato preparado que se muestra en la tabla 19.

3.1.2.1.4 CÁLCULO DE LOS VALORES DEDUCIDOS

Ya completada la inspección de campo, se procede al cálculo del PCI, el cual se basa en el cálculo de los valores deducidos.

El cálculo se realizó en el formato de la tabla 19, para un mejor desarrollo y obtención de resultados.

Totalizando cada tipo y nivel de severidad de daño se registró en los formatos, para así poder calcular su densidad individual de cada falla.

A continuación se muestra una de las 49 fichas (ver anexo B) realizadas como ejemplo del procedimiento a seguir:

Tabla 19: HOJA DE REGISTRO DE CAMPO DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO.

		ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO													
PLANILLA PCI															
Carretera:				Área de la muestra (m ²):											
Sección:				Prog resiv	Inicial:		Fecha:								
Unidad muestreada:				a:	Final:		Realizado por:								
Tipos de fallas															
OBSERVACIONES	1.- Piel de cocodrilo	m ²	11.- Bacheo	m ²	FORMA DE LA MUESTRA										
1.- LAS FALLAS 9 Y 14 SON IGNORADAS. 2.- LAS FALLAS 4 Y 8 SOLO DEBEN SER CONSIDERADAS SI EXISTEN LOSAS DE CONCRETO BAJO EL PAVIMENTO. 3.- SI EXISTE FALLA 2, NO SE CONSIDERA LA FALLA 12. 4.- SI HAY FALLA 11, NO SE CONSIDERA ALGUNA OTRA FALLA. 5.- SI HAY FALLA 10, NO SE CONSIDERA LA FALLA 8. 6.- FALLAS 1 Y 15 SIMULT SE MIDEN SEPARADAS.	2.- Exudación	m ²	12.- Agregados pulidos	m ²	DIMENSIONES										
	3.- Agrietamiento en bloque	m ²	13.- Huecos	Nº											
	4.- Elevaciones, hundimiento	m	14.- Cruce sumideros de rejilla (Cruce de rieles).	m ²											
	5.- Corrugaciones	m ²	15.- Ahuellamiento	m ²											
	6.- Depresiones	m ²	16.- Deformación por empuj	m ²											
	7.- Grietas de borde	m	17.- Grietas de desplazamie	m ²											
	8.- Reflexión de juntas	m	18.- Hinchamientos	m ²											
	9.- Desnivel de calzada	m	19.- Disgregación y desinte	m ²											
	10.- Grietas long. y transv.	m													
	TIPOS DE FALLAS EXISTENTES														
			B	M				A	B	M	A	B	M	A	B
TOTAL POR FALLA			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	
TOTAL POR FALLA			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	
TOTAL POR FALLA			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CÁLCULO DEL PCI															
TIPO DE FALLA	SEVERIDAD	TOTAL POR FALLA	DENSIDAD	VAL. DEDUCCIÓN	PCI = 100 - VDC										
					CONDICIÓN DEL PAVIMENTO:										
					Cantidad de VAL. DE DEDUCCIÓN mayores a 2										
					Entonces:										
					<input type="text"/>										
					<input type="text"/>										
VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN:				VDT =											
VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN CORREGIDO:				VDC =											

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20: MODELO DE LLENADO DE HOJA DE CAMPO PCI.

		ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO										
		PLANILLA PCI										
Carretera: Puno - Vilque - Mañazo			Área de la muestra (m ²):		229.8							
Sección: 1			Prog resiv a:		Inicial: 0+076.60		Fecha: Abril del 2016					
Unidad muestrada: 3					Final: 0+114.9		Realizado por: Wilder Ramos					
Tipos de fallas												
OBSERVACIONES	1.- Piel de cocodrilo	m ²	11.- Bacheo	m ²	FORMA DE LA MUESTRA DIMENSIONES 							
1.- LAS FALLAS 9 Y 14 SON IGNORADAS.	2.- Exudación	m ²	12.- Agregados pulidos	m ²								
2.- LAS FALLAS 4 Y 8 SOLO DEBEN SER CONSIDERADAS SI EXISTEN LOSAS DE CONCRETO BAJO EL PAVIMENTO.	3.- Agrietamiento en bloqu	m ²	13.- Huecos	Nº								
3.- SI EXISTE FALLA 2, NO SE CONSIDERA LA FALLA 12.	4.- Elevaciones, hundimient	m	14.- Cruce sumideros de rejilla (Cruce de rieles).	m ²								
4.- SI HAY FALLA 11, NO SE CONSIDERA ALGUNA OTRA FALLA.	5.- Corrugaciones	m ²	15.- Ahuellamiento	m ²								
5.- SI HAY FALLA 10, NO SE CONSIDERA LA FALLA 8.	6.- Depresiones	m ²	16.- Deformación por empuj	m ²								
6.- FALLAS 1Y 15 SIMULT SE MIDEN SEPARADAS.	7.- Grietas de borde	m	17.- Grietas de desplazamie	m ²								
	8.- Reflexión de juntas	m	18.- Hinchamientos	m ²								
	9.- Desnivel de calzada	m	19.- Disgregación y desinte	m ²								
	10.- Grietas long. y transv.	m										
TIPOS DE FALLAS EXISTENTES												
	1			3			5			6		
	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
	0.78	3.43			1.06		1.42			1.91		
	1.42	1.46			0.84		1.62			1.46		
		1.92			0.97		1.83			0.93		
TOTAL POR FALLA	2.20	6.81	0.00	0.00	2.87	0.00	4.87	0.00	0.00	4.30	0.00	0.00
	7			10			13			15		
	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
	2.16	0.87		1.56	1.94		2.00	3.00		4.25		
	1.09	1.34		2.23	1.08		1.00	2.00		4.06		
	3.08	1.58		1.92	0.66		1.00	1.00		2.36		
TOTAL POR FALLA	6.33	3.79	0.00	5.71	3.68	0.00	4.00	6.00	0.00	10.67	0.00	0.00
	17			19								
	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
	2.15	1.93		4.23								
	1.36	0.62		3.04								
	0.70	0.87		2.78								
TOTAL POR FALLA	4.21	3.42	0.00	10.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CÁLCULO DEL PCI												
TIPO DE FALLA	SEVERIDA D	CANTIDAD TOTAL POR	DENSIDAD	VAL. DEDUCCIÓN	PCI = 100 - VDC CONDICIÓN DEL PAVIMENTO: Cantidad de VAL. DE DEDUCCIÓN mayores a 2 0 Entonces: q=							
1	B	2.20	1.0%									
1	M	6.81	3.0%									
3	M	2.87	1.2%									
5	B	4.87	2.1%									
6	B	4.30	1.9%									
7	B	6.33	2.8%									
7	M	3.79	1.6%									
10	B	5.71	2.5%									
10	M	3.68	1.6%									
13	B	4.00	1.7%									
13	M	6.00	2.6%									
15	B	10.67	4.6%									
17	B	4.21	1.8%									
17	M	3.42	1.5%									
19	B	10.05	4.4%									
VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN:		VDT =										
VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN CORREGIDO:		VDC =										

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de la densidad se da de la división del total individual de cada falla entre el área total de la unidad de muestra en porcentaje.

El valor deducido, fue calculado con las curvas denominadas “valor deducido de la falla”, cuyos ábacos se presentan en el anexo A.

En la siguiente tabla se puede observar la forma de uso de los ábacos:

Tabla 21: USO DE ÁBACOS DE VALORES DEDUCIDOS.

TIPO DE FALLA	SEVERIDAD	CANTIDADES PARCIALES			TOTAL	DENSIDAD (%)	VALOR DE DEDUCCIÓN
1	B	0.78	1.42		2.20	1.0%	

Fuente: Elaboración propia.

De las hojas de registro obtenidas anteriormente se tiene el valor de la densidad que en nuestro caso es 1.0%, para la falla 1, con una severidad baja (B), estos valores se identificaran en el siguiente gráfico (piel de cocodrilo):

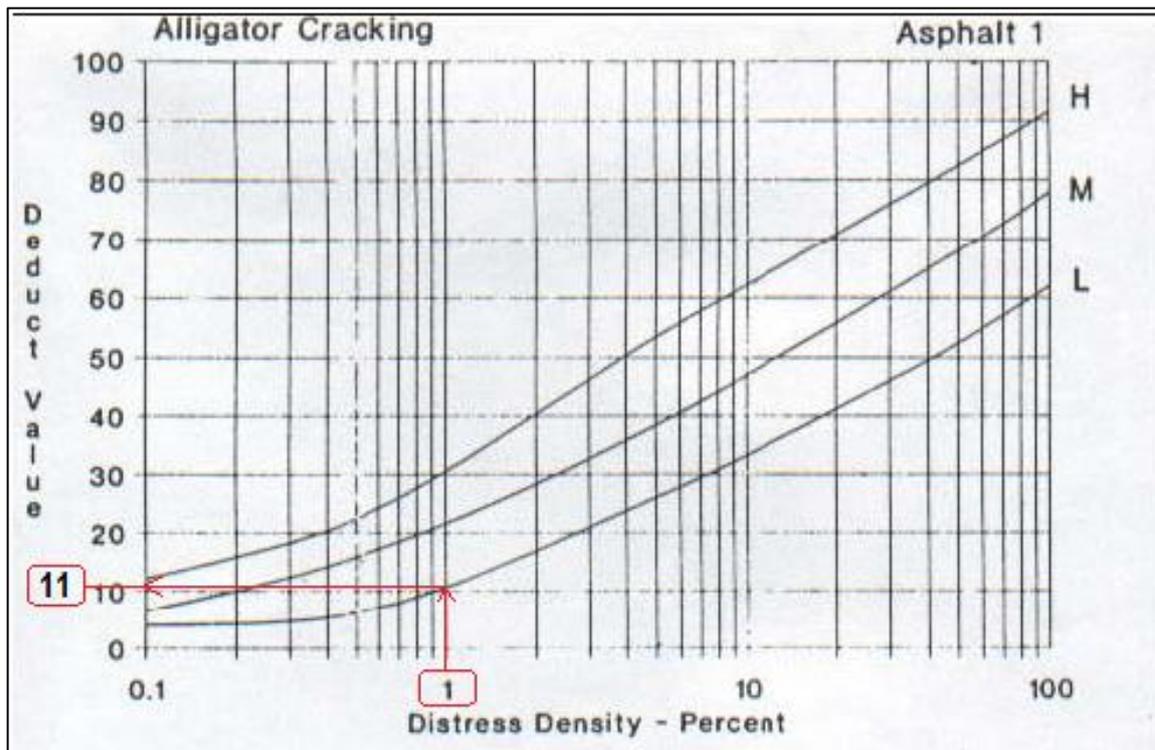


Gráfico 18: EJEMPLO DEL VALOR DE DEDUCCIÓN – PIEL DE COCODRILO.

Fuente: Manual de Evaluación de Pavimentos “Universidad Nacional de Ingeniería” – 2009.

Entonces el valor deducido será 11 para una falla 1 de severidad baja (B).

Después de obtener todos los valores de las fallas individuales tendremos el total de valores deducidos por cada unidad de muestra:

Tabla 22: VALOR DEDUCIDO TOTAL.

ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO		PLANILLA PCI										
Carretera: Puno - Vilque - Mañazo		Área de la muestra (m ²):	229.8									
Sección: 1	Prog resiv a:	Inicial: 0+076.60	Fecha: Abril del 2016									
Unidad muestrada: 3		Final: 0+114.9	Realizado por: Wilder Ramos									
Tipos de fallas												
OBSERVACIONES 1.- LAS FALLAS 9 Y 14 SON IGNORADAS. 2.- LAS FALLAS 4 Y 8 SOLO DEBEN SER CONSIDERADAS SI EXISTEN LOSAS DE CONCRETO BAJO EL PAVIMENTO. 3.- SI EXISTE FALLA 2, NO SE CONSIDERA LA FALLA 12. 4.- SI HAY FALLA 11, NO SE CONSIDERA ALGUNA OTRA FALLA. 5.- SI HAY FALLA 10, NO SE CONSIDERA LA FALLA 8. 6.- FALLAS 1Y 15 SIMULT SE MIDEN SEPARADAS.	1.- Piel de cocodrilo	m ²	11.- Bacheo	m ²	FORMA DE LA MUESTRA DIMENSIONES 							
	2.- Exudación	m ²	12.- Agregados pulidos	m ²								
	3.- Agrietamiento en bloqu	m ²	13.- Huecos	Nº								
	4.- Elevaciones, hundimient	m	14.- Cruce sumideros de rejilla (Cruce de rieles).	m ²								
	5.- Corrugaciones	m ²	15.- Ahuellamiento	m ²								
	6.- Depresiones	m ²	16.- Deformación por empuj	m ²								
	7.- Grietas de borde	m	17.- Grietas de desplazamie	m ²								
	8.- Reflexión de juntas	m	18.- Hinchamientos	m ²								
	9.- Desnivel de calzada	m	19.- Disgregación y desinte	m ²								
	10.- Grietas long. y transv.	m										
TIPOS DE FALLAS EXISTENTES												
1			3			5			6			
B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	
0.78	3.43			1.06		1.42			1.91			
1.42	1.46			0.84		1.62			1.46			
	1.92			0.97		1.83			0.93			
TOTAL POR FALLA	2.20	6.81	0.00	0.00	2.87	0.00	4.87	0.00	0.00	4.30	0.00	0.00
7			10			13			15			
B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	
2.16	0.87		1.56	1.94		2.00	3.00		4.25			
1.09	1.34		2.23	1.08		1.00	2.00		4.06			
3.08	1.58		1.92	0.66		1.00	1.00		2.36			
TOTAL POR FALLA	6.33	3.79	0.00	5.71	3.68	0.00	4.00	6.00	0.00	10.67	0.00	0.00
17			19									
B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	
2.15	1.93		4.23									
1.36	0.62		3.04									
0.70	0.87											
TOTAL POR FALLA	4.21	3.42	0.00	10.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CALCULO DEL PCI												
TIPO DE FALLA	SEVERIDA D	CANTIDAD TOTAL POR	DENSIDAD	VAL. DEDUCCIÓN	PCI = 100 - VDC CONDICIÓN DEL PAVIMENTO: Cantidad de VAL. DE DEDUCCIÓN mayores a 2 14 Entonces: q = 7							
1	B	2.20	1.0%	11								
1	M	6.81	3.0%	32								
3	M	2.87	1.2%	3								
5	B	4.87	2.1%	5								
6	B	4.30	1.9%	6								
7	B	6.33	2.8%	3								
7	M	3.79	1.6%	8								
10	B	5.71	2.5%	1								
10	M	3.68	1.6%	4								
13	B	4.00	1.7%	27								
13	M	6.00	2.6%	50								
15	B	10.67	4.6%	20								
17	B	4.21	1.8%	8								
17	M	3.42	1.5%	13								
19	B	10.05	4.4%	3								
VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN:				VDT =	194.00							
VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN CORREGIDO:				VDC =								

Fuente: Elaboración Propia.

En esta unidad de muestreo el VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN (**VDT**) es de 194.

3.1.2.1.5 CÁLCULO DEL PCI DE LA UNIDAD DE MUESTRA

Una vez calculado el VALOR DEDUCIDO TOTAL (VDT=194) para la unidad de muestreo, se procede a calcular el VALOR DEDUCIDO CORREGIDO (VDC) utilizando el gráfico correspondiente.

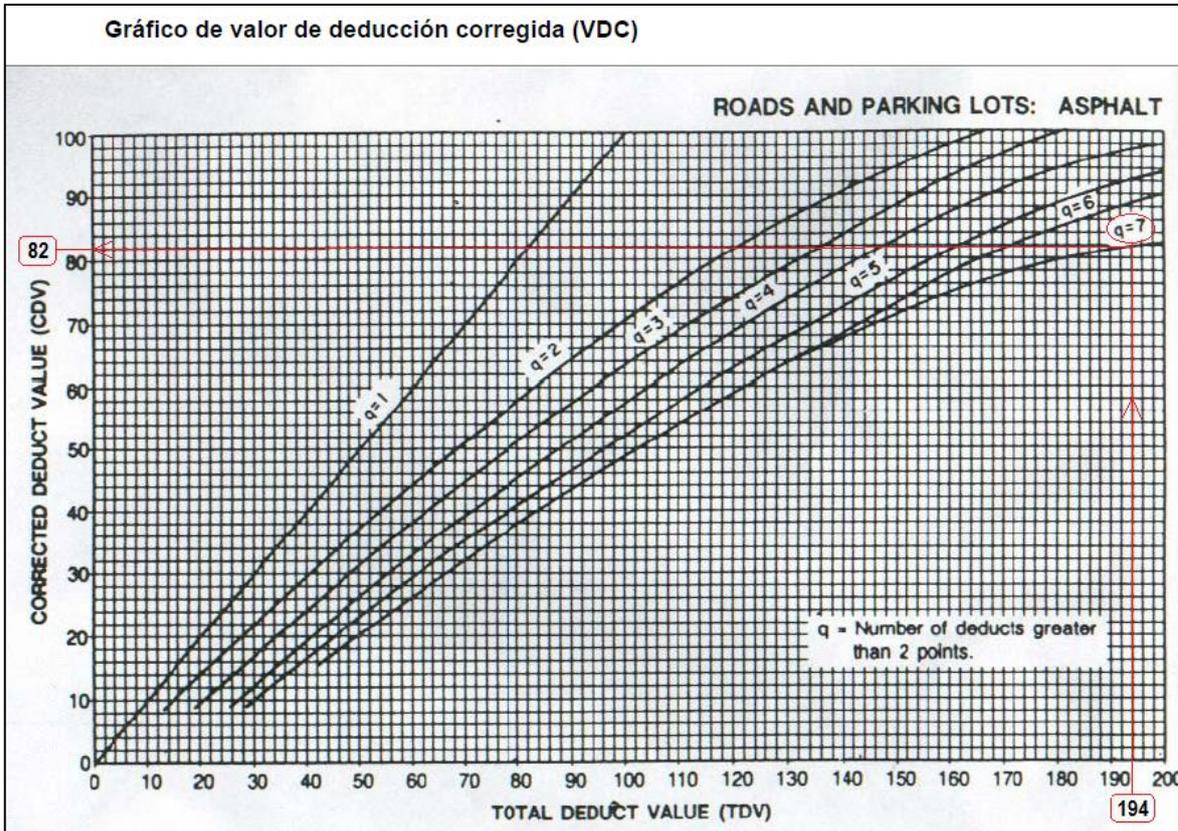


Gráfico 19: EJEMPLO DEL CÁLCULO DEL VALOR DE DEDUCCIÓN CORREGIDO.

Fuente: Manual de Evaluación de Pavimentos “Universidad Nacional de Ingeniería” – 2009.

Entonces el VALOR DEDUCIDO CORREGIDO (VDC) será 82 para un valor deducido total de 194.

Finalmente, con el valor deducido corregido obtenido se procede a calcular el valor de PCI de la unidad con la fórmula 17:

$$PCI = 100 - VDC$$

$$PCI = 100 - 82$$

$$PCI = 18$$

Finalmente, nuestro formato será llenado como se muestra a continuación:

Tabla 23: FORMATO LLENADO DE ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO.

		ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO												
PLANILLA PCI														
Carretera: Puno - Vilque - Mañazo					Área de la muestra (m ²):					229.8				
Sección: 1					Prog resiv a:		Inicial: 0+076.60			Fecha: Abril del 2016				
Unidad muestrada: 3					Prog resiv a:		Final: 0+114.9			Realizado por: Wilder Ramos				
Tipos de fallas														
OBSERVACIONES		1.- Piel de cocodrilo	m ²	11.- Bacheo	m ²	FORMA DE LA MUESTRA DIMENSIONES 								
1.- LAS FALLAS 9 Y 14 SON IGNORADAS. 2.- LAS FALLAS 4 Y 8 SOLO DEBEN SER CONSIDERADAS SI EXISTEN LOSAS DE CONCRETO BAJO EL PAVIMENTO. 3.- SI EXISTE FALLA 2, NO SE CONSIDERA LA FALLA 12. 4.- SI HAY FALLA 11, NO SE CONSIDERA ALGUNA OTRA FALLA. 5.- SI HAY FALLA 10, NO SE CONSIDERA LA FALLA 8. 6.- FALLAS 1 Y 15 SIMULT SE MIDEN SEPARADAS.		2.- Exudación	m ²	12.- Agregados pulidos	m ²									
		3.- Agrietamiento en bloqu	m ²	13.- Huecos	Nº									
		4.- Elevaciones, hundimient	m	14.- Cruce sumideros de rejilla (Cruce de rieles).	m ²									
		5.- Corrugaciones	m ²	15.- Ahuellamiento	m ²									
		6.- Depresiones	m ²	16.- Deformación por empuj	m ²									
		7.- Grietas de borde	m	17.- Grietas de desplazamie	m ²									
		8.- Reflexión de juntas	m	18.- Hinchamientos	m ²									
		9.- Desnivel de calzada	m	19.- Disgregación y desinte	m ²									
		10.- Grietas long. y transv.	m											
		TIPOS DE FALLAS EXISTENTES												
			1			3			5			6		
			B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
			0.78	3.43			1.06		1.42			1.91		
			1.42	1.46			0.84		1.62			1.46		
				1.92			0.97		1.83			0.93		
TOTAL POR FALLA			2.20	6.81	0.00	0.00	2.87	0.00	4.87	0.00	0.00	4.30	0.00	0.00
			7			10			13			15		
			B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
			2.16	0.87		1.56	1.94		2.00	3.00		4.25		
			1.09	1.34		2.23	1.08		1.00	2.00		4.06		
			3.08	1.58		1.92	0.66		1.00	1.00		2.36		
TOTAL POR FALLA			6.33	3.79	0.00	5.71	3.68	0.00	4.00	6.00	0.00	10.67	0.00	0.00
			17			19								
			B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
			2.15	1.93		4.23								
			1.36	0.62		3.04								
			0.70	0.87		2.78								
TOTAL POR FALLA			4.21	3.42	0.00	10.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CÁLCULO DEL PCI														
TIPO DE FALLA	SEVERIDAD	CANTIDAD TOTAL POR	DENSIDAD	VAL. DEDUCCIÓN	PCI = 100 - VDC 18.00 CONDICIÓN DEL PAVIMENTO: MUY MALO Cantidad de VAL. DE DEDUCCIÓN mayores a 2 14 Entonces: q = 7									
1	B	2.20	1.0%	11										
1	M	6.81	3.0%	32										
3	M	2.87	1.2%	3										
5	B	4.87	2.1%	5										
6	B	4.30	1.9%	6										
7	B	6.33	2.8%	3										
7	M	3.79	1.6%	8										
10	B	5.71	2.5%	1										
10	M	3.68	1.6%	4										
13	B	4.00	1.7%	27										
13	M	6.00	2.6%	50										
15	B	10.67	4.6%	20										
17	B	4.21	1.8%	8										
17	M	3.42	1.5%	13										
19	B	10.05	4.4%	3										
VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN:				VDT =										194.00
VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN CORREGIDO:				VDC =										82.00

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.2.2 DEFLEXIÓN Y DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EMPLEANDO LA VIGA BENKELMAN – PROCEDIMIENTO

- Para medir las deflexiones en la superficie del pavimento objeto de la evaluación, se utilizó el deflectómetro conocido como la Viga Benkelman, el cual es un instrumento que funciona según el principio de una palanca, uno de sus extremos se apoya en el pavimento deformado ante la aplicación de una carga, mientras que el otro está en contacto sensible con un deformímetro de precisión, con dial de lecturas graduado en centésimas de mm.
- La carga de ensayos, del orden de 18,000 lb (8,200 kg), las proporciona el eje posterior simple de llanta doble de un camión, la verificación se hizo mediante pesaje del camión cargado con material granular. La presión de inflado de las llantas se verificó en 80 psi (5.6 kg/cm²).
- Los puntos del pavimento a ser ensayados fueron marcados convenientemente con una línea transversal al camino. Sobre dicha línea se localizó el punto de ensayo a una distancia prefijada del borde. Se utilizó la distancia indicada en la siguiente tabla:

Tabla 24: CUADRO DISTANCIA DE ENSAYO DE DEFLETOMETRÍA.

ANCHO DEL CARRIL	DISTANCIA DEL PUNTO DE ENSAYO DESDE EL BORDE DEL PAVIMENTO.
2.70m	0.45m
3.00m	0.60m
3.30m	0.75m
3.60m o más	0.90m

Fuente: Manual de Ensayo de Materiales MTC E 1002 – 2016.

- La rueda dual externa del camión fue colocada sobre el punto seleccionado; para la correcta ubicación de la misma, se colocó en la parte trasera extrema del camión una guía vertical en correspondencia con el eje de carga. Desplazando lentamente el camión, se hizo coincidir la guía vertical con la línea marcada a 60cm del borde del pavimento, de modo que simultáneamente el punto a ensayar quedo entre ambas llantas de la rueda dual.
- Una vez localizado el punto donde se debería realizar el ensayo, se colocó la llanta a usarse sobre el punto de manera que este coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del neumático (punto D).
- Se colocó la viga en la misma posición como si estuviera entre las llantas pero en la parte exterior de las mismas, haciendo coincidir, el extremo del brazo móvil con el eje vertical del centro de gravedad. Tomando como punto de referencia una varilla vertical adosada a la parte trasera del camión, se marcó la viga de manera tal que,

en adelante, bastó con hacer coincidir (la marca con la varilla vertical) para asegurar que el extremo de la viga coincida con el centro de las llantas, en el momento de iniciar las mediciones.

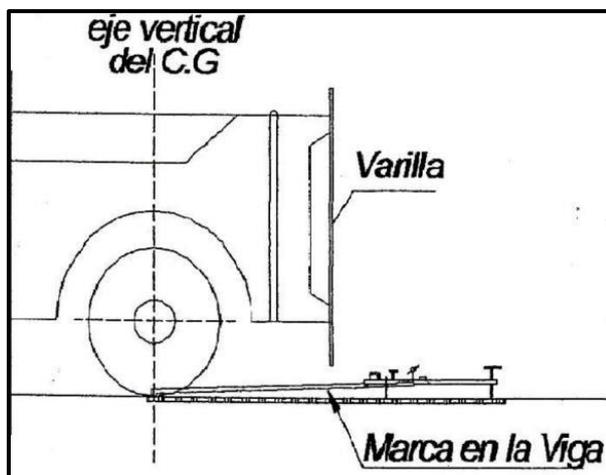


Figura 11: POSICIÓN INICIAL DE LA VIGA BENKELMAN.

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones (S. Hoffman & M. del Aguila, 1985).

- Una vez instalada la viga en el punto de medición coincidiendo con la varilla vertical y la marca inicial, se verificó que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se puso el dial en cero, se activó el vibrador y mientras el camión se desplazó muy lentamente se procedió a tomar lecturas conforme a la varilla vertical vaya coincidiendo con la primera y las marcas adicionales y una lectura final cuando el camión se alejó lo suficiente del punto de ensayo que el indicador del dial ya no tenga movimiento, registro que correspondió al punto de referencia con deflexión cero.

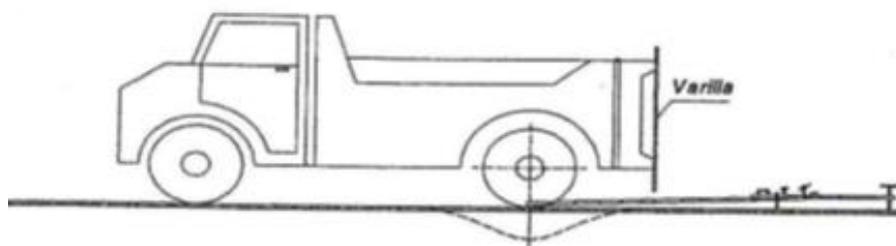


Figura 12: POSICIÓN A 0 CM – DEFLEXIÓN MÁXIMA.

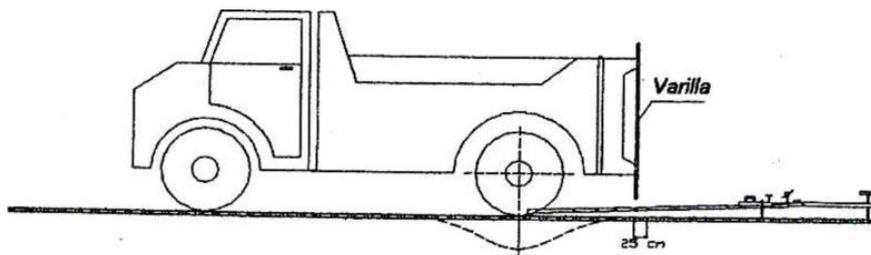


Figura 13: POSICIÓN A 25CM – D25.

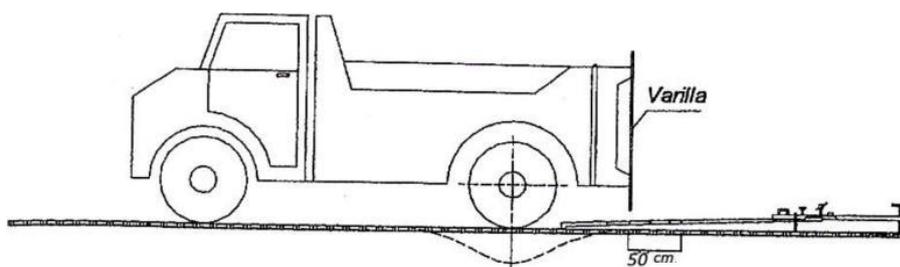


Figura 14: POSICIÓN A 50CM – D50.

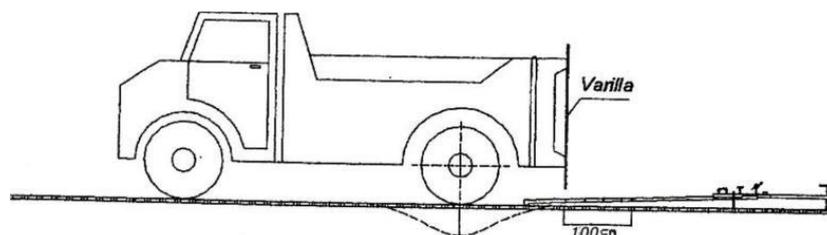


Figura 15: POSICIÓN A 75CM – D75.

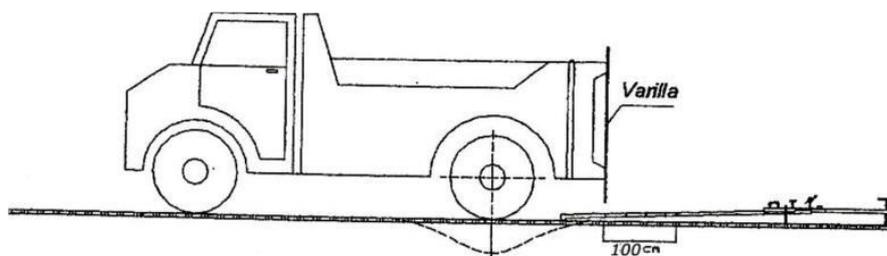


Figura 16: POSICIÓN A 100CM – D100.

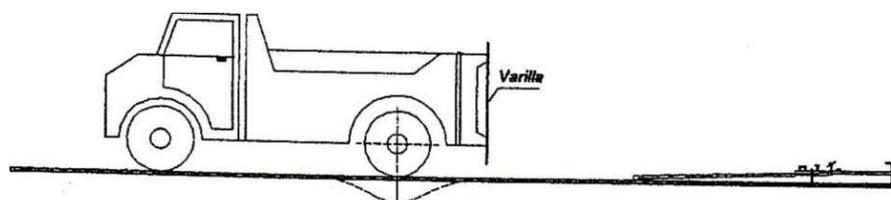


Figura 17: POSICIÓN A 200CM – D200.



Gráfico 20: LECTURA DE DIAL DE LA VIGA BENKELMAN.



Gráfico 21: AJUSTE DE LA VIGA BENKELMAN KM 07 + 800.



Gráfico 22: ÚLTIMA LECTURA DEL DIAL DEFORMACIÓN CERO.

3.1.2.2.1 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA

Se realizó para:

SECTOR : PUNO - MAÑAZO
 TRAMO : km 06+500 al km 08+500
 ENSAYO : 1
 CARRIL : DERECHO

a.- TENIENDO LAS MEDICIONES EFECTUADAS EN CAMPO

Tabla 25: MEDICIONES EFECTUADAS EN CAMPO.

PROGR. (Km)	Lado	LECTURAS DE CAMPO					
		L ₀	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	L _{MAX}
06+500	Der.	0	8	12	13	18	24
06+550	Der.	0	7	11	19	22	26
06+600	Der.	0	5	12	16	21	27
06+650	Der.	0	8	10	16	19	24
06+700	Der.	0	6	8	12	20	29
06+750	Der.	0	9	15	18	21	23
06+800	Der.	0	8	11	15	19	26
06+850	Der.	0	5	14	18	19	23
06+900	Der.	0	7	23	26	28	33
06+950	Der.	0	7	18	20	22	25
07+000	Der.	0	7	15	21	22	33
07+050	Der.	0	10	19	22	23	26
07+100	Der.	0	9	17	20	22	25
07+150	Der.	0	5	12	19	22	27
07+200	Der.	0	5	15	20	24	30
07+250	Der.	0	5	12	15	17	19
07+300	Der.	0	9	15	17	21	22
07+350	Der.	0	8	17	21	23	26
07+400	Der.	0	4	13	16	18	21
07+450	Der.	0	12	21	23	24	27
07+500	Der.	0	10	16	19	20	23
07+550	Der.	0	8	18	22	25	27
07+600	Der.	0	9	12	14	16	19
07+650	Der.	0	8	18	23	36	38
07+700	Der.	0	9	15	19	23	27
07+750	Der.	0	6	12	18	19	23
07+800	Der.	0	8	13	18	20	24
07+850	Der.	0	9	16	22	25	27
07+900	Der.	0	9	12	20	22	24
07+950	Der.	0	9	18	23	25	29
08+000	Der.	0	9	16	22	26	29
08+050	Der.	0	9	17	21	25	28
08+100	Der.	0	9	18	21	26	29
08+150	Der.	0	9	15	18	19	23
08+200	Der.	0	9	18	23	27	28
08+250	Der.	0	9	23	26	29	34
08+300	Der.	0	9	12	20	22	25
08+350	Der.	0	9	19	29	34	37
08+400	Der.	0	12	20	21	23	26
08+450	Der.	0	9	18	28	36	38
08+500	Der.	0	6	15	22	23	32

b.- CALCULAMOS LAS DEFLEXIONES CORREGIDAS (D0).

De acuerdo a la siguiente fórmula:

$$D0 = (L_0 - L_f) \times K \times C$$

Fórmula 18: DEFLEXIONES CORREGIDAS

Donde:

D0= Deflexión simple (corregida).

L₀ = Lectura inicial de la estación.

L_f= Lectura final de la estación.

K = Constante de la viga (relación de brazos 2:1).

C= Corrección de unidades para milímetros.

Para L₀: con; K = 2 C = 1.1

Tabla 26: DESARROLLO DE CÁLCULO DEL D0 CORREGIDO.

L ₀	L _{MAX}	DESARROLLO (L _{MAX} - L ₀) · K · C	D ₀
0	24	(24 - 0) · 2 · 1.1	52.8
0	26	(26 - 0) · 2 · 1.1	57.2
0	27	(27 - 0) · 2 · 1.1	59.4
0	24	(24 - 0) · 2 · 1.1	52.8
0	29	(29 - 0) · 2 · 1.1	63.8
0	23	(23 - 0) · 2 · 1.1	50.6
0	26	(26 - 0) · 2 · 1.1	57.2
0	23	(23 - 0) · 2 · 1.1	50.6
0	33	(33 - 0) · 2 · 1.1	72.6
0	25	(25 - 0) · 2 · 1.1	55.0
0	33	(33 - 0) · 2 · 1.1	72.6
0	26	(26 - 0) · 2 · 1.1	57.2
0	25	(25 - 0) · 2 · 1.1	55.0
0	27	(27 - 0) · 2 · 1.1	59.4
0	30	(30 - 0) · 2 · 1.1	66.0
0	19	(19 - 0) · 2 · 1.1	41.8
0	22	(22 - 0) · 2 · 1.1	48.4
0	26	(26 - 0) · 2 · 1.1	57.2
0	21	(21 - 0) · 2 · 1.1	46.2
0	27	(27 - 0) · 2 · 1.1	59.4

c.- CALCULAMOS EL PROMEDIO ARITMÉTICO O DEFLEXIÓN MEDIA

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}$$

Fórmula 19: DEFLEXIÓN MEDIA

Donde:

n : Número total de medidas.

D_i: Deflexiones desde i=1 a i=n.

\bar{D} : Deflexión media de n deflexiones.

REEMPLAZANDO EN LA FÓRMULA 19:

$$\bar{D} = 56.76$$

d.- HALLAMOS LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR

para "n" ≤ 30 →
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{(n - 1)}}$$

Fórmula 20: DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Tabla 27: DESARROLLO DESVIACIÓN ESTÁNDAR.

Nº	D ₀	DESARROLLO	$\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2$
1	52.8	(52.8 – 56.76) ²	15.68
2	57.2	(57.2 – 56.76) ²	0.19
3	59.4	(59.4 – 56.76) ²	6.97
4	52.8	(52.8 – 56.76) ²	15.68
5	63.8	(63.8 – 56.76) ²	49.56
6	50.6	(50.6 – 56.76) ²	37.95
7	57.2	(57.2 – 56.76) ²	0.19
8	50.6	(50.6 – 56.76) ²	37.95
9	72.6	(72.6 – 56.76) ²	250.91
10	55.0	(55.0 – 56.76) ²	3.10
11	72.6	(72.6 – 56.76) ²	250.91
12	57.2	(57.2 – 56.76) ²	0.19
13	55.0	(55.0 – 56.76) ²	3.10
14	59.4	(59.4 – 56.76) ²	6.97
15	66.0	(66.0 – 56.76) ²	85.38
16	41.8	(41.8 – 56.76) ²	223.80
17	48.4	(48.4 – 56.76) ²	69.89
18	57.2	(57.2 – 56.76) ²	0.19
19	46.2	(46.2 – 56.76) ²	111.51
20	59.4	(59.4 – 56.76) ²	6.97
	56.76		1,177.09

REEMPLAZANDO EN LA FÓRMULA 20.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1,177.09}{20 - 1}} = 7.87$$

E.- HALLANDO EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN (C.V.)

$$C.V. = \frac{\sigma}{\bar{D}} \times 100$$

Fórmula 21: COEFICIENTE DE VARIACIÓN

Donde:

C.V. = Coeficiente de variación.

σ = Desviación estándar.

\bar{D} = Deflexión media.

REEMPLAZAMOS EN LA FÓRMULA 21.

$$C.V. = \frac{7.87}{56.76} \times 100 = 13.90$$

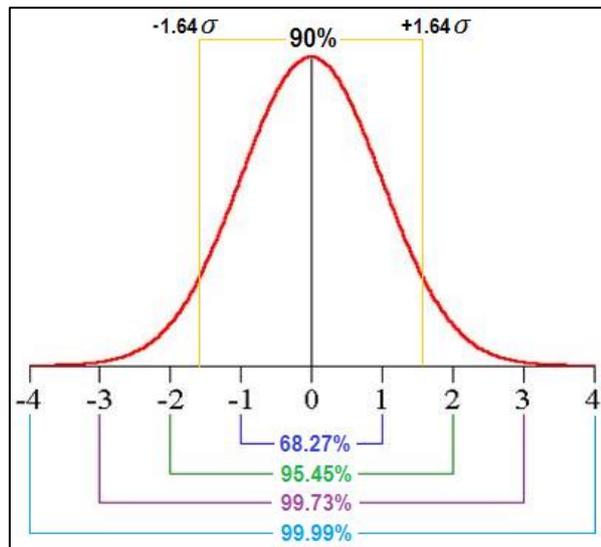


Gráfico 23: PROBABILIDAD DE DISTRIBUCIÓN NORMAL – LÍMITE INFERIOR Y SUPERIOR.

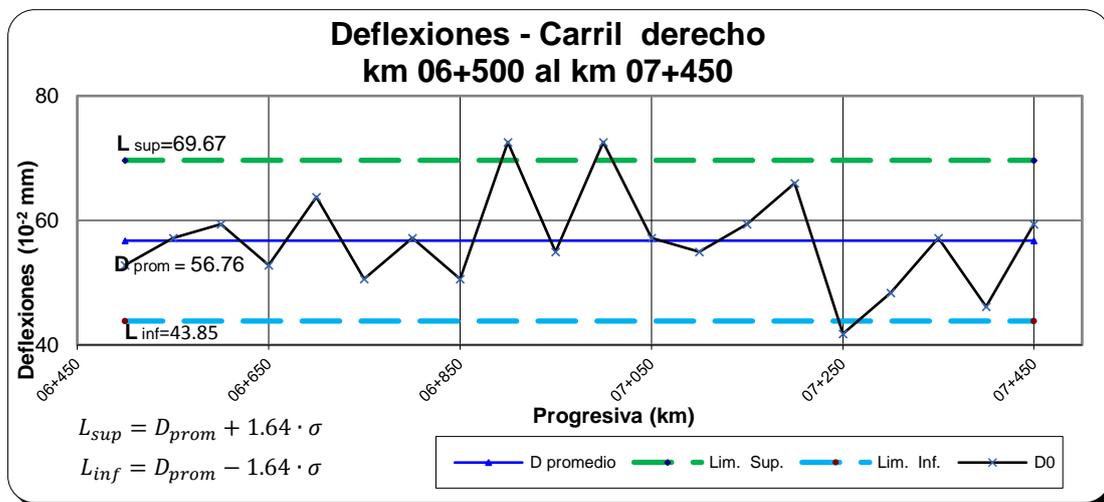


Gráfico 24: DISPERSIONES DE DEFLEXIONES.

F.- CALCULAMOS LA DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA

$$D_c = \bar{D} + 1.282 (\sigma)$$

Fórmula 22: DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA

Donde:

D_c = Deflexión característica.

\bar{D} = Deflexión media.

σ = Desviación estándar.

REEMPLAZANDO EN LA FÓRMULA 22.

$$D_c = 56.76 + 1.282 (7.87)$$

$$D_c = 66.85 \times 10^{-2} \text{mm}$$

G.- CALCULAMOS LA DEFLEXIÓN ADMISIBLE

La deflexión admisible, corresponde a aquella que alcanza el pavimento al final del tiempo de diseño. Por lo tanto, esta deflexión se calcula considerando la sollicitación de cargas para ese tiempo, representado en el valor “N” de ejes equivalentes acumulados hasta el último día de servicio. Para lo cual el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos en la Sección Suelos y Pavimentos, ha adoptado la relación propuesta para el paquete estructural del pavimento, por el CONREVIAl (Consortio de Rehabilitación Vial) – Estudio de rehabilitación de carreteras del País. MTC-Perú, la que se muestra a continuación:

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

Fórmula 23: DEFLEXIÓN ADMISIBLE

Donde:

D_{adm} = Deflexión admisible en mm (a comparar con deflexiones Viga Benkelman).

N = Número de ejes estándares equivalentes de 8.2Tn acumuladas en el periodo de diseño, expresado en millones.

Los valores de N resultan del estudio de tránsito, lo cual integra conteos de vehículos.

REEMPLAZANDO EN LA FÓRMULA 23.

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

El valor de N calculado del estudio de tráfico resulta ser:

$$N = 435,088.13$$

$$N = 0.435 \times 10^6$$

$$D_{adm} = \left(\frac{1.15}{0.435} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$D_{adm} = 127.5 \times 10^{-2} mm$$

3.1.2.3 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EMPLEANDO EL RUGOSÍMETRO MERLIN – PROCEDIMIENTO

Para la ejecución de los ensayos fue realizada por dos personas que trabajaron conjuntamente, un operador que conduce el equipo y realiza las lecturas y un auxiliar que las anota. Asimismo, se seleccionó tramos de aproximadamente 400 m de longitud, sobre un determinado carril de una vía. Las mediciones se efectuaron siguiendo la huella exterior del tráfico.

Para determinar un valor de rugosidad se debieron efectuar 200 observaciones de las “irregularidades que presenta el pavimento” (desviaciones relativas a la cuerda promedio), cada una de las cuales son detectadas por el patín móvil del MERLIN, y que a su vez son indicadas por la posición que adopta el puntero sobre la escala graduada del tablero, generándose de esa manera las lecturas.



Gráfico 25: EQUIPO PARA EL RUGOSÍMETRO MERLIN KM 08+200.

Las observaciones se realizaron estacionando el equipo a intervalos regulares, generalmente cada 2m de distancia; en la práctica esto se resuelve tomando como referencia la longitud de circunferencia de la rueda del Rugosímetro MERLIN, que es aproximadamente esa dimensión, es decir, cada ensayo se realizó al cabo de una vuelta de la rueda.



Gráfico 26: LECTURA DEL EQUIPO KM 08+000.

En cada observación se hizo descansar el instrumento sobre el camino apoyado en tres puntos fijos e invariables: la rueda, el apoyo fijo trasero y el estabilizador para ensayo (Gráfico 4, Corte B-B). La posición adoptada por el puntero correspondió a una lectura entre 1 y 50, la que se anotó en un formato de campo. El formato consta de una cuadrícula compuesta por 20 filas y 10 columnas; empezando por el casillero (1,1), los datos se llenan de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha.

Tabla 28: FORMATO DE CAMPO DEL RUGOSÍMETRO MERLIN

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	30	39	→									
2	27	33										
3	23	25										
4	32	32										
5	24	21										
6	27	36										
7	33	25										
8	20	35										
9	32	30										
10	36	↓										
11	23											
12	35											
13	39											
14	36											
15	34											
16	25											
17	26											
18	37											
19	39											
20	29											

El proceso de medición se continuó realizando a una velocidad promedio de 2 km/h.

La prueba empezó estacionando el equipo al inicio del trecho de ensayo, al operar se esperó que el puntero se estabilice, observando la posición que adoptó respecto de la escala colocada sobre el tablero, realizando así la lectura que fue anotada por el auxiliar. Paso seguido, se continuó con el ensayo tomando el instrumento por las manijas, elevándolo y desplazándolo la distancia constante seleccionada para usarse entre un ensayo y otro (una vuelta de la rueda). En la nueva ubicación se repitió la operación explicada y así sucesivamente hasta completar las 200 lecturas.

El espaciado entre los ensayos no es un factor crítico, pero es recomendable que las lecturas se realicen siempre estacionando la rueda en una misma posición, para lo cual se pone una señal o marca llamativa sobre la llanta, la que debe quedar siempre en contacto con el piso. Ello facilita la labor del operador quien, una vez hecha la lectura, levanta el equipo y controla que la llanta gire una vuelta haciendo coincidir nuevamente la marca sobre el piso.

3.1.2.3.1 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DEL IRI

Para el caso:

SECTOR : PUNO – VILQUE - MAÑAZO

TRAMO : km 06 + 500 al km 06 + 900

ENSAYO : 1

CARRIL : IZQUIERDO

a.- OBTENIENDO LOS DATOS DE CAMPO, CON EL RUGOSÍMETRO MERLIN

Tabla 29: DATOS DE CAMPO CON EL RUGOSÍMETRO MERLIN.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	30	39	32	23	36	43	27	30	22	38
2	27	33	28	28	27	31	25	41	42	41
3	23	25	27	30	38	33	25	39	43	44
4	32	32	30	28	35	28	40	28	37	37
5	24	21	28	29	24	33	37	31	29	35
6	27	36	30	24	34	34	33	26	39	40
7	33	25	34	28	34	31	24	40	37	29
8	20	35	33	27	37	32	35	24	40	35
9	32	30	29	37	25	33	35	23	44	34
10	36	28	31	38	31	30	28	36	32	40
11	23	34	33	29	35	36	31	44	35	42

12	35	21	29	23	33	29	26	23	34	27
13	39	44	27	25	30	40	29	29	43	30
14	36	35	34	29	34	31	30	27	34	41
15	34	23	35	28	32	41	34	33	43	38
16	25	30	24	29	31	42	36	37	26	41
17	26	26	28	25	29	34	37	26	43	31
18	37	38	34	37	30	29	33	22	40	43
19	39	31	32	30	39	33	39	28	42	31
20	29	30	25	31	44	41	28	32	40	27

b.- REALIZAMOS HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

Tabla 30: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS.

Intervalo de desviaciones	frecuencia								
1	0	11	0	21	2	31	12	41	6
2	0	12	0	22	2	32	9	42	4
3	0	13	0	23	7	33	12	43	6
4	0	14	0	24	6	34	14	44	5
5	0	15	0	25	9	35	11	45	0
6	0	16	0	26	6	36	7	46	0
7	0	17	0	27	10	37	10	47	0
8	0	18	0	28	13	38	5	48	0
9	0	19	0	29	14	39	7	49	0
10	0	20	1	30	14	40	8	50	0

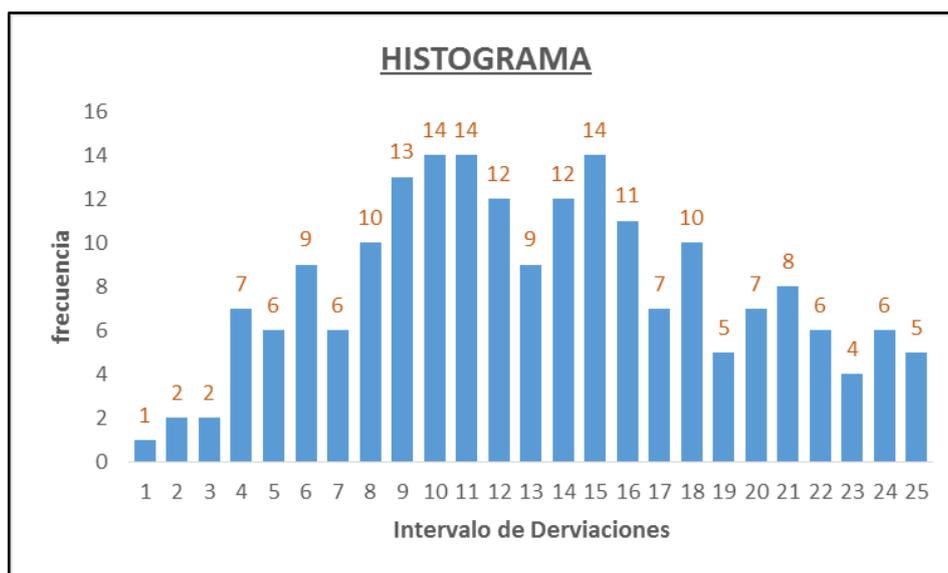


Gráfico 27: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS.

c.- EFECTUANDO DESCARTE DE DATOS

* PARA EL INTERVALO 4

Número de frecuencias "7"

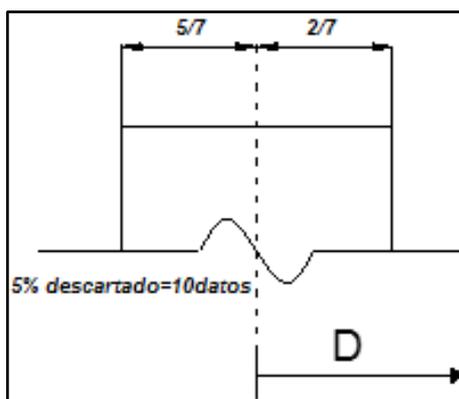


Gráfico 28: DESCARTE DE DATOS PARA EL INTERVALO 4.

* PARA EL INTERVALO 24

Número de frecuencias 6

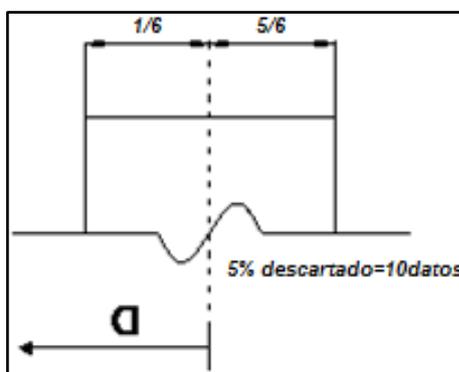


Gráfico 29: DESCARTE DE DATOS PARA EL INTERVALO 4.

d.- CÁLCULO DEL RANGO HISTOGRAMA DE FRECUENCIA

$$= 2/7 + 19 + 1/6$$

$$=97.26 \text{ mm}$$

e.- FACTOR DE CORRECCIÓN

$$F. C. = \frac{(EP \times 10)}{[(LI - LF) \times 5]}$$

Fórmula 24: FACTOR DE CORRECCIÓN

Donde:

EP : Espesor de la pastilla.

LI : Posición inicial del puntero.

LF : Posición final del puntero.

Cálculo del factor de corrección, para espesor de pastilla: 6.2 mm.

Tabla 31: FACTOR DE CORRECCIÓN.

Espesor de pastilla (mm).	6.2
Lectura de posición inicial del puntero (LI).	26
Lectura de posición final del puntero (LF).	13

$$F.C. = \frac{(6.2 \times 10)}{[(26 - 13) \times 5]}$$

$$F.C. = 0.954$$

f.- CÁLCULO DEL RANGO "D" CORREGIDO

$D \times F.C.$

Fórmula 25: RANGO "D" CORREGIDO

Donde:

D : Ancho del histograma.

F.C. : Factor de corrección.

REEMPLAZANDO EN LA FÓRMULA 25:

$$D = 97.26 \times 0.954$$

$$D = 92.79 \text{ mm}$$

g.- DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD EN LA ESCALA IRI

$$IRI = 0.593 + 0.0471D$$

Fórmula 26: CÁLCULO DEL IRI.

Donde:

IRI: Índice de Regularidad Internacional.

D: Ancho del histograma.

REEMPLAZANDO EN LA FÓRMULA 26:

$$IRI = 0.593 + 0.0471(92.79)$$

$$IRI = 4.96 \text{ m/km}$$

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN POR EL MÉTODO DE ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO (PCI)

El índice de condición de pavimento es uno de los métodos de la presente evaluación del pavimento. En el estudio de la carretera Puno – Vilque – Mañazo, específicamente el pavimento existente, su principal objetivo es el de determinar el Índice de Condición de Pavimento (PCI) expresado en porcentaje.

El valor del PCI es muy importante para la presente evaluación, ya que nos permitirá saber cuál es el estado actual del pavimento.

4.1.1 DATOS RECOLECTADOS PARA LA OBTENCIÓN DEL PCI

Los formatos con datos recolectados se presentan en los ANEXOS.

4.1.2 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO PCI

En el siguiente cuadro se presentan la síntesis de los ensayos del Índice de Condición de Pavimento PCI. En la cual la columna de calificación se realizó de acuerdo a la escala sugerida por la norma ASTM D6433 (ver gráfico 8, pág. 60).

Tabla 32: RESUMEN DE RESULTADOS PCI

SECCIÓN	UNID. MUESTRA	PROGRESIVAS		PCI	
		INICIO	FIN	PCI	CALIFICACION
1	3	0+076.60	0+114.9	18	MUY MALO
	18	0+651.1	0+689.4	20	MUY MALO
	33	1+225.6	1+263.9	18	MUY MALO
	48	1+800.1	1+838.4	19	MUY MALO
	63	2+374.6	2+412.9	29	MALO
	78	2+949.1	2+987.4	20	MUY MALO
	93	3+523.6	3+561.9	18	MUY MALO

	108	4+098.1	4+136.4	48	REGULAR
	123	4+672.6	4+710.9	26	MALO
	138	5+247.1	5+285.4	26	MALO
	153	5+821.6	5+859.9	35	MALO
	168	6+396.1	6+434.4	26	MALO
	183	6+970.6	7+008.9	23	MUY MALO
	198	7+545.1	7+583.4	18	MUY MALO
	213	8+119.6	8+157.9	23	MUY MALO
	228	8+694.1	8+732.4	26	MALO
2	236	9+000.5	9+038.8	26	MALO
	242	9+230.3	9+268.6	26	MALO
	248	9+460.1	9+498.4	24	MUY MALO
	254	9+689.9	9+728.2	23	MUY MALO
	260	9+919.7	9+958.0	29	MALO
	266	10+149.5	10+187.8	30	MALO
	272	10+379.3	10+417.6	37	MALO
	278	10+609.1	10+647.4	36	MALO
	284	10+838.9	10+877.2	31	MALO
	290	11+068.7	11+107.0	41	REGULAR
	296	11+298.5	11+336.8	41	REGULAR
	302	11+528.3	11+566.6	39	MALO
	308	11+758.1	11+796.4	29	MALO
	314	11+987.9	12+026.2	18	MUY MALO
320	12+217.7	12+256.0	24	MUY MALO	
326	12+447.5	12+485.8	18	MUY MALO	
3	328	12+524.1	12+562.4	NO ES POSIBLE APLICAR EL MÉTODO PCI POR LA POCA SUPERFICIE EXISTENTE DE CARPETA DE RODADURA.	-
	336	12+830.5	12+868.8		-
	344	13+135.9	13+175.2		-
	352	13+443.3	13+481.6		-
	360	13+749.7	13+788.0		-
	368	14+056.1	14+094.4		-
	376	14+362.5	14+400.8		-
	384	14+668.9	14+707.2		-
	392	14+975.3	15+013.6		-
	400	15+281.7	15+320.0		-
	408	15+588.1	15+626.4		-
	416	15+894.5	15+932.8		-
	424	16+200.9	16+239.2		-
432	16+507.3	16+545.6	-		
440	16+813.7	16+852.0	-		
4	446	17+043.5	17+081.8	-	
	452	17+273.3	17+311.6	-	
	458	17+503.1	17+541.4	-	
	464	17+732.9	17+771.2	-	
	470	17+962.7	18+001.0	-	

	476	18+192.5	18+230.8	NO ES POSIBLE APLICAR EL MÉTODO PCI POR LA POCA SUPERFICIE EXISTENTE DE CARPETA DE RODADURA.	-
	482	18+422.3	18+460.6		-
	488	18+652.1	18+690.4		-
	494	18+881.9	18+920.2		-
	500	19+111.7	19+150.0		-
	506	19+341.5	19+379.8		-
	512	19+571.3	19+609.6		-
	518	19+801.1	19+839.4		-
5	524	20+030.9	20+069.2	NO ES POSIBLE APLICAR EL MÉTODO PCI POR LA POCA SUPERFICIE EXISTENTE DE CARPETA DE RODADURA.	-
	529	20+222.4	20+260.7		-
	534	20+413.9	20+452.2		-
	539	20+605.4	20+643.7		-
	544	20+796.9	20+835.2		-
	549	20+988.4	21+026.7		-
	554	21+179.9	21+218.2		-
	559	21+371.4	21+409.7		-
	564	21+562.9	21+601.2		-
	569	21+754.4	21+792.7		-
	574	21+945.9	21+984.2		-
	579	22+137.4	22+175.7		-
584	22+328.9	22+367.2	-		
6	590	22+558.7	22+597.0	55	REGULAR
	618	23+631.1	23+669.4	52	REGULAR
	646	24+703.5	24+741.8	53	REGULAR
	674	25+775.9	25+814.2	53	REGULAR
	702	26+848.3	26+886.6	31	MALO
	730	27+920.7	27+959.0	54	REGULAR
	758	28+993.1	29+031.4	63	BUENO
	786	30+065.5	30+103.8	43	REGULAR
	814	31+137.9	31+176.2	65	BUENO
	842	32+210.3	32+248.6	58	BUENO
	870	33+282.7	33+321.0	58	BUENO
	898	34+355.1	34+393.4	63	BUENO
	926	35+427.5	35+465.8	59	BUENO
	954	36+499.9	36+538.2	63	BUENO
	982	37+572.3	37+610.6	62	BUENO
1010	38+644.7	38+683.0	61	BUENO	
1038	39+717.1	39+755.4	31	MALO	

Para la evaluación de la carretera Puno – Vilque – Mañazo (km 00+000 al km 39 +900) se tiene como Índice de Condición de Pavimento promedio por secciones lo siguiente:

Tabla 33: RESUMEN METODO PCI PROMEDIO POR SECCIONES.

SECCIÓN	PROGRESIVAS		PCI PROM.	CONDICIÓN PROM
	INICIO	FIN		
1	00+000	09+000.5	25	MALO
2	09+005.5	12+524.1	30	MALO
3	12+524.1	17+043.5	-	-
4	17+043.5	20+030.9	-	-
5	20+030.9	22+520.4	-	-
6	22+520.4	39+900	54	REGULAR
TOTAL	00+000	39+900	36	MALO

De la tabla anterior se puede dividir los cuatro (04) kilómetros más críticos en dos partes los 2 primeros kilómetros más críticos deberán encontrarse entre el km 00+000 al km 12+524 por tener este tramo un Índice de Condición de Pavimento de “**Malo**”, luego de una inspección visual de la vía en estudio se decidió que el tramo sería del *km 06+500 al km 08+500*. Los otros 2 kilómetros más críticos comprenderán las secciones donde existe poca superficie de carpeta de rodadura, es decir, entre el km 12+524 al km 22+520, por consiguiente, nuestros 2 últimos kilómetros más críticos se encontrarán entre el tramo: *km 16+400 al km 18+400*.

4.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE TRÁFICO

El presente estudio de tráfico es parte de los estudios para la presente evaluación del pavimento; en el estudio del tramo Puno – Vilque - Mañazo, su principal objetivo es el de determinar la demanda vehicular al año 2015, complementando el tránsito que circuló años anteriores.

Debe destacarse el hecho de que la determinación del tráfico muy importancia para la presente evaluación.

El presente estudio de tráfico tiene por objetivo directo determinar el Índice Medio Diario Anual (IMDA) que circuló por la vía y el Número de Ejes de Carga Equivalentes (ESAL), por su parte la obtención del ESAL permite estimar las deflexiones admisibles del pavimento.

4.2.1 EVALUACIÓN DEL TRÁNSITO EXISTENTE

El tránsito vehicular existente en la carretera Puno – Vilque - Mañazo, ubicada en el departamento de Puno, vía de transporte que conectan los departamentos de Puno y Arequipa.

El flujo vehicular está compuesto en su mayoría por el paso de vehículos ligeros: autos, camionetas, combis, microbuses y por vehículos pesado como: B2, C2, C3, C4.

4.2.2 CÁLCULO DEL ÍNDICE MEDIO DIARIO

El índice medio diario mensual no viene a ser otra cosa que el número total de vehículos que pasan durante un periodo de 1 mes, dividido entre el número de días (30).

El índice medio diario anual no viene a ser otra cosa que el número total de vehículos que pasan durante un periodo de 1 año, dividido entre el número de días (365).

4.2.3 RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de los datos obtenidos en los conteos y clasificación vehicular en campo, se procedió a analizar la consistencia de la misma.

En los siguientes cuadros se resumen los recuentos de tráfico, clasificación mensual, como también anual, cuyos datos fueron tomados del 03 al 09 de noviembre del 2009.

Tabla 34: ÍNDICE MEDIO DIARIO

Tipo de vehículos	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Total semanal	IMDs Σ Vi/7	FC	IMDs x FC
Autos	32	32	28	33	38	43	26	232	33	1.01116771	33
Satation Wagon	73	56	71	104	101	121	111	637	91	1.01116771	92
Camioneta Pick Up	49	50	58	60	59	61	48	385	55	1.01116771	56
Panel	4	4	6	0	10	5	3	32	5	1.01116771	5
Rural (Combi)	146	143	153	223	213	246	194	1318	188	1.02737275	193
Micro	19	3	13	10	10	6	5	66	9	1.02737275	9
Omnibus 2E y 3E	17	15	14	12	19	15	20	112	16	1.02737275	16
Camión 2E	23	28	29	15	41	27	20	183	26	1.02737275	27
Camión 3E	2	7	0	0	0	10	6	25	4	1.02737275	4
Camión 4E	20	7	11	24	30	22	15	129	18	1.02737275	18
Semi trayler	0	1	0	2	0	0	0	3	0	1.02737275	0
Trayler	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.02737275	0
TOTAL IMD	385	346	383	483	521	556	448	3122	446		453

Fuente: Expediente Técnico de la Obra Rehabilitación Y Mejoramiento De La Carretera Emp. Pe-3s (Puno) - Vilque – Mañazo – Emp. Pe-34a (Huataquita)

IMD	453 Veh/día
------------	-------------

4.2.4 CLASIFICACIÓN VEHICULAR PROMEDIO

A partir de los resultados de clasificación vehicular de campo, se procedió a determinar la composición vehicular de la muestra, la cual está conformada de la siguiente manera:

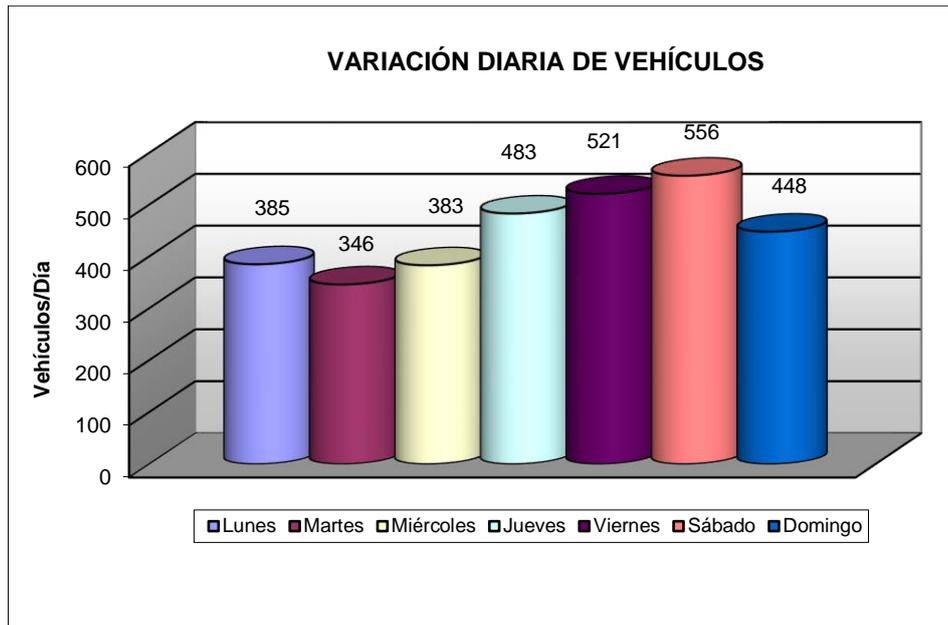


Gráfico 30: VARIACIÓN VEHICULAR DIARIA.

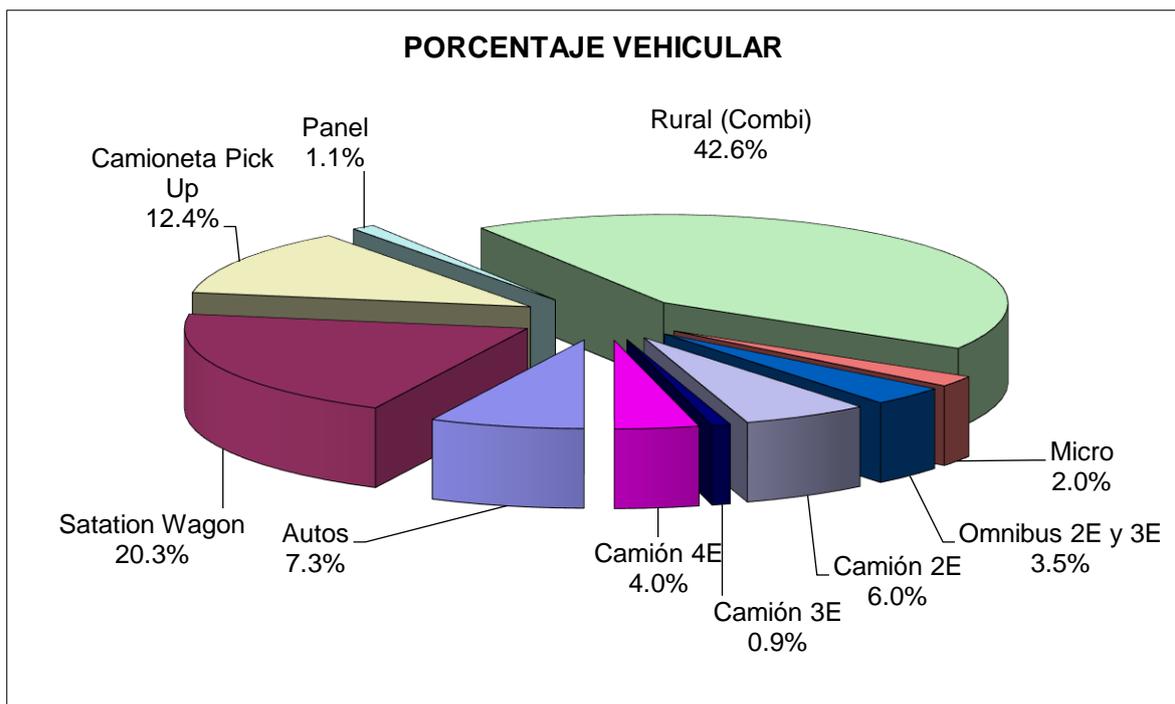


Gráfico 31: CLASIFICACIÓN VEHICULAR.

4.2.5 FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA, FEC

Con el objeto de evaluar el efecto dañino, en un pavimento flexible, de las cargas diferentes a un eje estándar, se han considerado los factores de equivalencia de carga por eje.

En la tabla 35 se muestran los factores de equivalencia de carga publicada en la Guía AASHTO 1986.

Tabla 35: FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA.

Carga Bruta Por Eje		Factores de Equivalencia de Carga		
KN	lb	Ejes	Ejes	Ejes
		Simples	Tandem	Tridem
4.45	1,000	0.00002		
8.9	2,000	0.00018		
17.8	4,000	0.00209	0.0003	
26.7	6,000	0.01043	0.001	0.0003
35.6	8,000	0.0343	0.003	0.001
44.5	10,000	0.0877	0.007	0.002
53.4	12,000	0.189	0.014	0.003
62.3	14,000	0.36	0.027	0.006
71.2	16,000	0.623	0.047	0.011
80	18,000	1	0.077	0.017
89	20,000	1.51	0.121	0.027
97.9	22,000	2.18	0.18	0.04
106.8	24,000	3.03	0.26	0.057
115.6	26,000	4.09	0.364	0.08
124.5	28,000	5.39	0.495	0.109
133.4	30,000	6.97	0.658	0.145
142.3	32,000	8.88	0.857	0.191
151.2	34,000	11.18	1.095	0.246
160.1	36,000	13.93	1.38	0.313
169	38,000	17.2	1.7	0.393
178	40,000	21.08	2.08	0.487
187	42,000	25.64	2.51	0.597
195.7	44,000	31	3	0.723
204.5	46,000	37.24	3.55	0.868
213.5	48,000	44.5	4.17	1.033
222.4	50,000	52.88	4.86	1.22
231.3	52,000		5.63	1.43
240.2	54,000		6.47	1.66
249	56,000		7.41	1.91
258	58,000		8.45	2.2
267	60,000		9.59	2.51
275.8	62,000		10.84	2.85
284.5	64,000		12.22	3.22
293.5	66,000		13.73	3.62
302.5	68,000		15.38	4.05
311.5	70,000		17.19	4.52
320	72,000		19.16	5.03
329	74,000		21.32	5.57
338	76,000		23.66	6.15
347	78,000		26.22	6.78
356	80,000		29	7.45
364.7	82,000		32	8.2
373.6	84,000		35.3	8.9
382.5	86,000		38.8	9.8
391.4	88,000		42.6	10.6
400.3	90,000		46.8	11.6

Fuente: Del Apéndice de la Guía AASHTO para el diseño de Estructuras de Pavimentos.

4.2.6 CÁLCULO DEL FACTOR CAMIÓN, FC

Se entiende por factor camión al número de aplicaciones de ejes estándar de 80 kN (8.2 tn), correspondiente al paso de un vehículo. El factor camión se puede obtener por pesaje, sin embargo, este método puede resultar costoso, por lo cual para esta investigación se optó por emplear el Reglamento Nacional con D.S. N° 058-2003-MTC; específicamente en el anexo IV, donde se desarrolla las

dimensiones y pesos por eje de vehículos pesados; los autos o vehículos ligeros no se incorporan en la mencionada norma, porque el paso de un vehículo ligero ejerce un daño no significativo en el pavimento.

Tabla 36: TABLA DE PESOS Y MEDIDAS.

Configuración Vehicular	Descripción Gráfica de los Vehículos	Long. Máx (m)	Eje Delant	Peso Máximo (t)				Peso Bruto Max. (t)
				Conjunto de Ejes Posteriores				
				1º	2º	3º	4º	
C2		12,30	7	11	-	-	-	18
C3		13,20	7	18	-	-	-	25
T2S2		20,50	7	11	18	-	-	36
T3S3		20,50	7	18	25	-	-	48 ⁽¹⁾
C3R2		23,00	7	18	11	11	-	47
C3R4		23,00	7	18	18	18	-	48 ⁽¹⁾
B2		13,20	7	11	-	-	-	18
B3-1		14,00	7	16	-	-	-	23

(1) Vehículos con facilidad de distribución de peso por ejes

Fuente: Reglamento Nacional de Vehículos - DECRETO SUPREMO Nº 058-2003-MTC.

Cálculo del F.C. del camión C2:

El camión C2 tiene un eje delantero simple con rueda simple de 7 tn y un eje posterior simple con ruedas dobles de 11 tn. (ver tabla 36). Para calcular el daño producido por cada eje, debemos convertir el peso en toneladas a KN. ó Lb. aproximadamente 7 y 11 tn equivalen a 68 y 107 KN. con estos valores se

ingresa a la tabla 35 y se calculan los factores equivalentes de carga para cada eje.

De la interpolación se obtuvo que los FEC son 0.53 y 3.03 respectivamente.

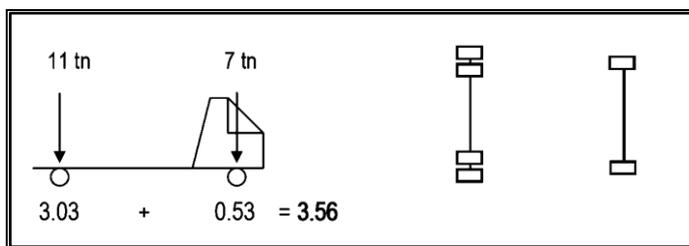


Gráfico 32: EL FACTOR EQUIVALENTE DE CARGA DEL CAMIÓN C2.

El factor equivalente de carga del camión C2 es 3.56.

De igual manera se calcula el factor camión de cada uno de los tipos de vehículos: vehículos ligeros (0.0001), B2 (3.56), C2 (3.56), C3 (2.53), C4 (2.30).

4.2.7 CÁLCULO DE EJES EQUIVALENTES

El número de ejes equivalentes resulta necesario para hallar la deflexión admisible en un pavimento.

Se ha visto por conveniente emplear las cargas máximas permitidas por la Norma de Pesos y Dimensiones de Vehículos Para la Circulación en las Carreteras de la Red Vial Nacional, publicado por el Reglamento Nacional de Vehículos, que en su Anexo 4: Peso Vehicular en Carretera indica el peso máximo por eje independiente o grupos de ejes para el tipo de vehículos que circulan por la presente carretera.

En los siguientes cuadros se presentan los Ejes Equivalentes de Carga (ESAL).

Tabla 37: EJES EQUIVALENTES DE CARGA (ESAL)

TIPO DE VEHÍCULO	N° veh/día (2 sent.) (1)	N° veh/día (1 sent.) (2)=50%(1)	N° veh/año 3=2x365	Factor camión F.C. (4)	ESAL en carril de diseño (5)=3x4	Factor de crecimiento (6)	ESAL _{diseño} (7)=5x6
Autos	388.0	194.0	70810.0	0.001	70.81	10.99	778.20
B2	16.0	8.0	2920.0	3.56	10395.2	10.65	110,708.88
C2	27.0	13.5	4927.5	3.56	17541.9	12.01	210,678.22
C3	4.0	2.0	730.0	2.53	1846.9	12.01	22,181.27
C4	18.0	9.0	3285.0	2.30	7555.5	12.01	90,741.56
TOTAL	453	226.5	82672.5		37410.310		435,088.13

ESAL

 0.435×10^6

4.2.8 DEFLEXIONES ADMISIBLES

Para la presente evaluación de pavimento, es necesario hallar la deflexión máxima o admisible, que un pavimento puede soportar, para soportar una carga de tráfico conocida o proyectada antes de entrar a la fase de fatiga, para ello utilizamos la fórmula 23:

$$D_{adm} = \left(\frac{1.15}{ESAL} \right)^{0.25}$$

$$D_{adm} = \left(\frac{1.15}{0.435} \right)^{0.25}$$

$$D_{adm} = 127.5 \times 10^{-2} mm$$

$$D_{adm} = 127.5 \times 10^{-2} mm$$

4.3 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA DEFLEXIÓN Y DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA, EMPLEANDO LA VIGA BENKELMAN

La deflectometría es parte de los estudios para la presente evaluación del pavimento; en el estudio de la carretera Puno – Vilque - Mañazo, su principal objetivo es el de determinar la deflexión característica y el radio de curvatura.

La medida de la deflexión y determinación del radio de curvatura es muy importante para la evaluación del pavimento.

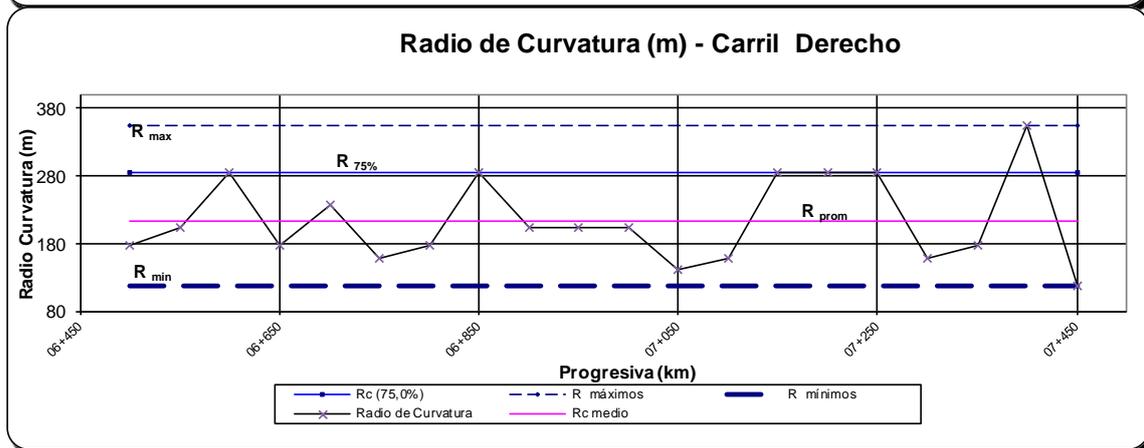
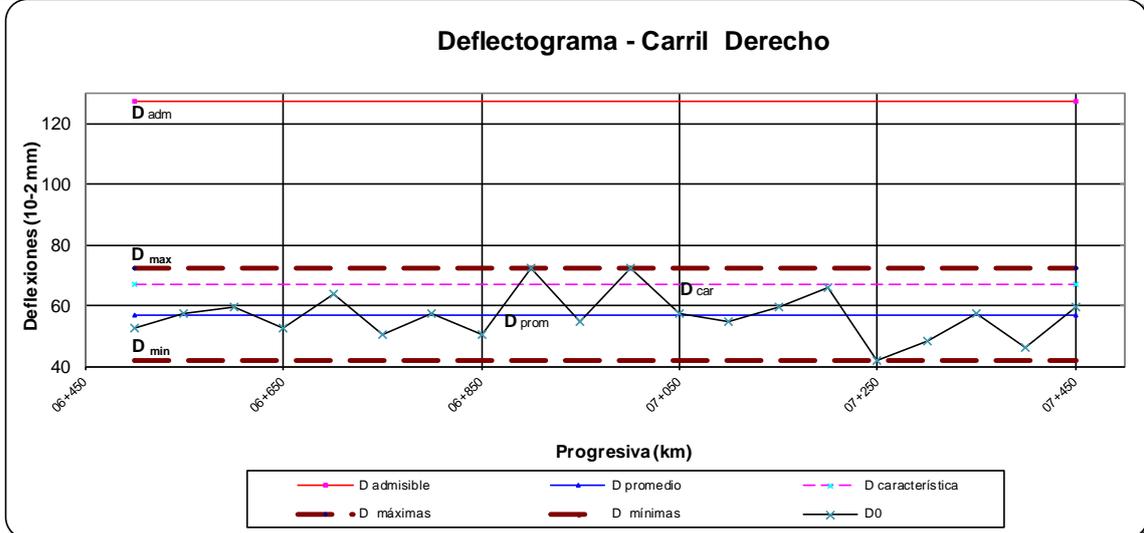
De acuerdo al Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”, Sección: Suelos y Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones; donde nos indica que una vez efectuadas las mediciones se elaborará un deflectograma, que permita analizar la variabilidad de la capacidad estructural del pavimento existente, para finalmente determinar los sectores de características o comportamiento homogéneo, definiendo para cada sector homogéneo la correspondiente deflexión característica, que es el valor que mejor representa un determinado sector.

4.3.1 ENSAYOS REALIZADOS CON LA VIGA BENKELMAN

Los formatos con la recolección de datos se presentan en el anexo D, a continuación se muestran los deflectogramas de los ensayos realizados:

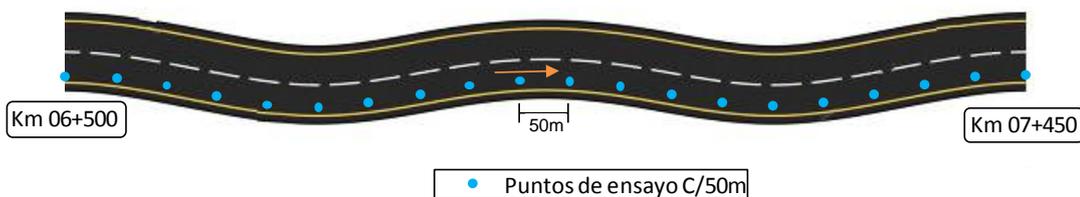
EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO POR DEFLECTOMETRÍA E ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DE LA CARRETERA: PUNO – VILQUE – MAÑAZO - 4KM CRÍTICOS - 2015

SECTOR : Km. 06+500 - 07+450 Estructura: BASE GRANULAR/CARPETA



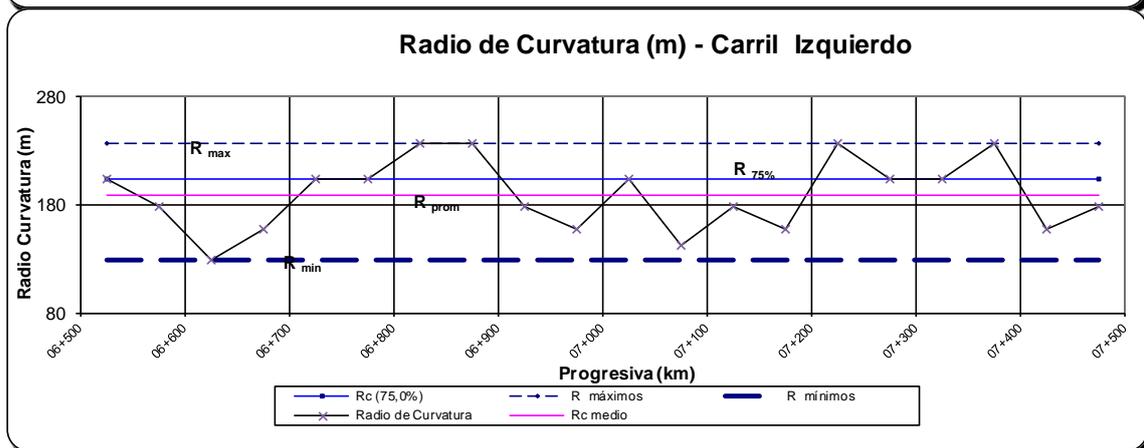
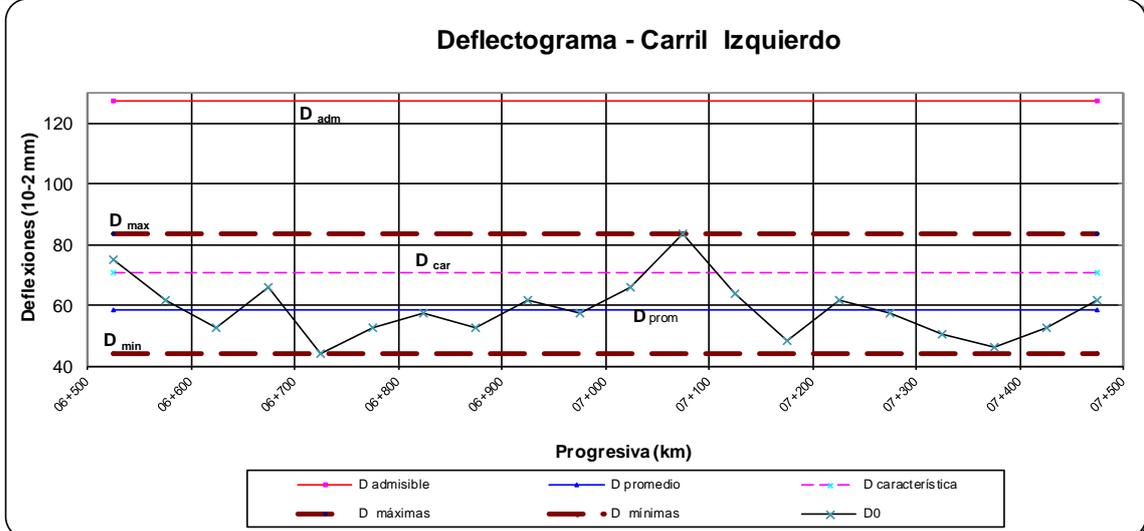
Cálculos	
Deflexiones (x10⁻² mm)	Radio de Curvatura (m)
$D_m = 56.76$ $\sigma = 7.87$	$R_{C(75,0\%)} = 284.09$
$D_c = D_m + 1.282 \times \sigma = 66.85$	$R_{medio} = 213.41$

CROQUIS



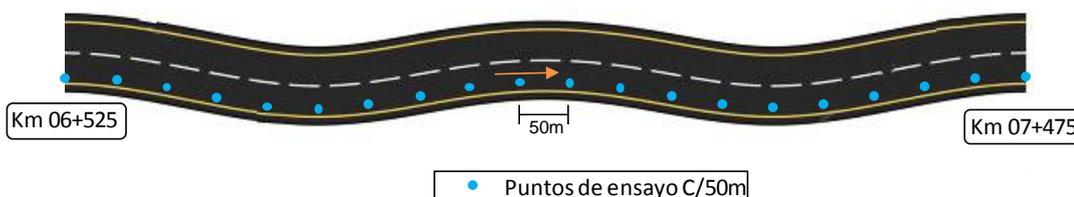
EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO POR DEFLECTOMETRÍA E ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DE LA CARRETERA: PUNO – VILQUE – MAÑAZO - 4KM CRÍTICOS - 2015

SECTOR : Km. 06+525 - 07+475 Estructura: BASE GRANULAR/CARPETA



Cálculos	
Deflexiones (x10⁻² mm)	Radio de Curvatura (m)
$D_m = 58.63 \quad \sigma = 9.56$	$R_{C(75,0\%)} = 202.92$
$D_c = D_m + 1.282 \times \sigma = 70.88$	$R_{medio} = 189$

CROQUIS

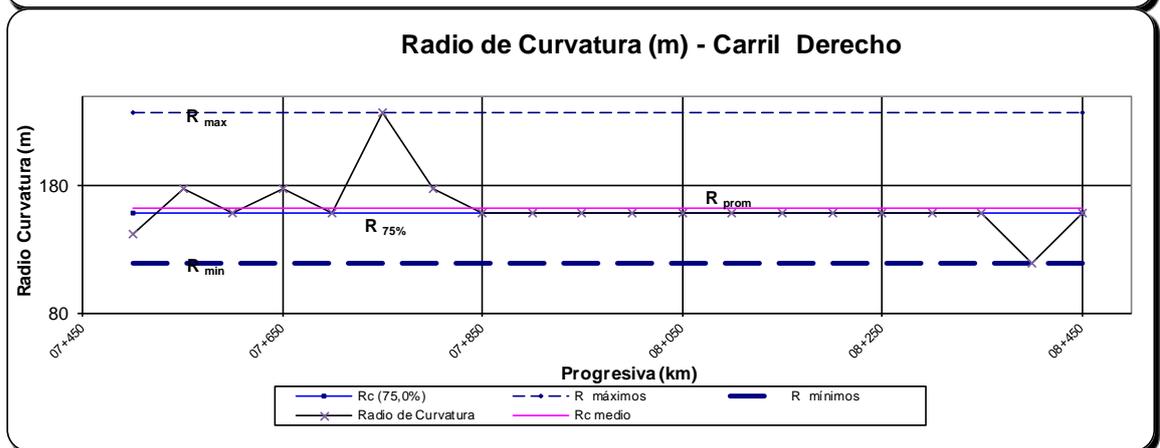
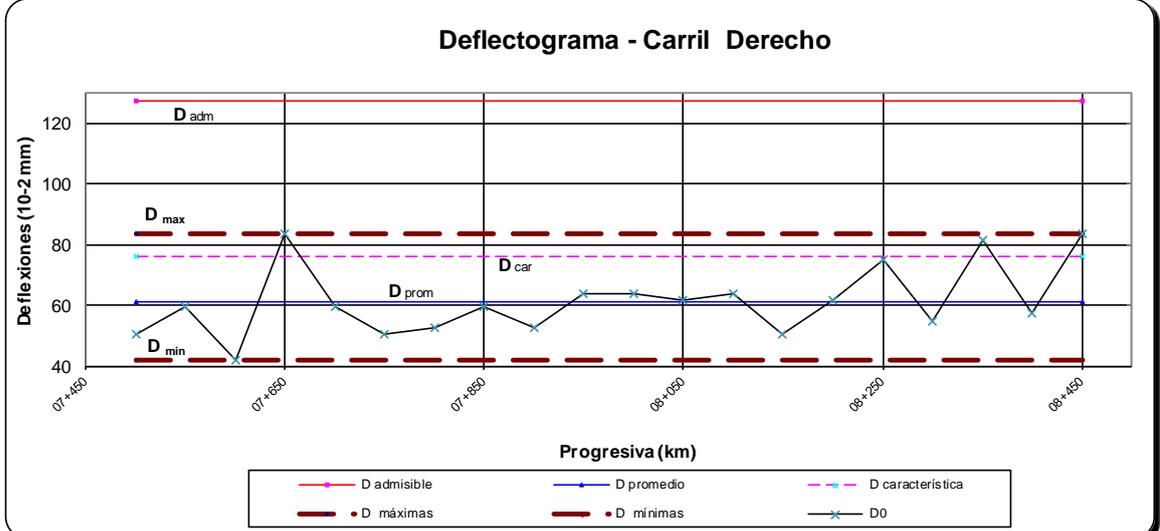




EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO POR DEFLECTOMETRÍA E ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DE LA CARRETERA: PUNO – VILQUE – MAÑAZO - 4KM CRÍTICOS - 2015

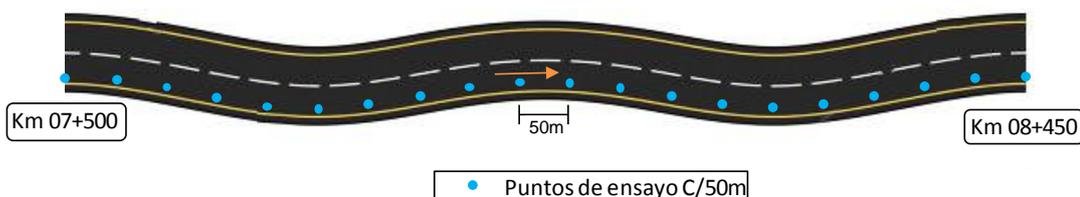


SECTOR : Km. 07+500 - 08+450 Estructura: BASE GRANULAR/CARPETA



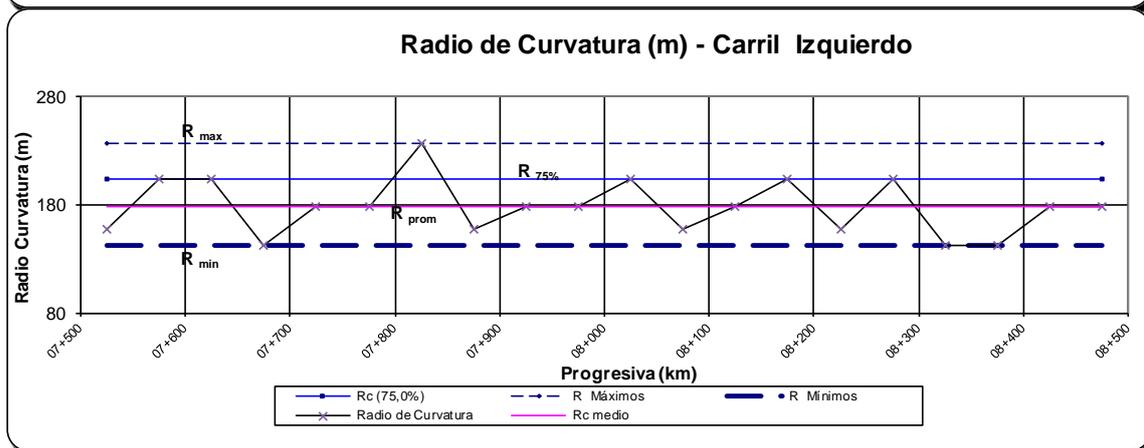
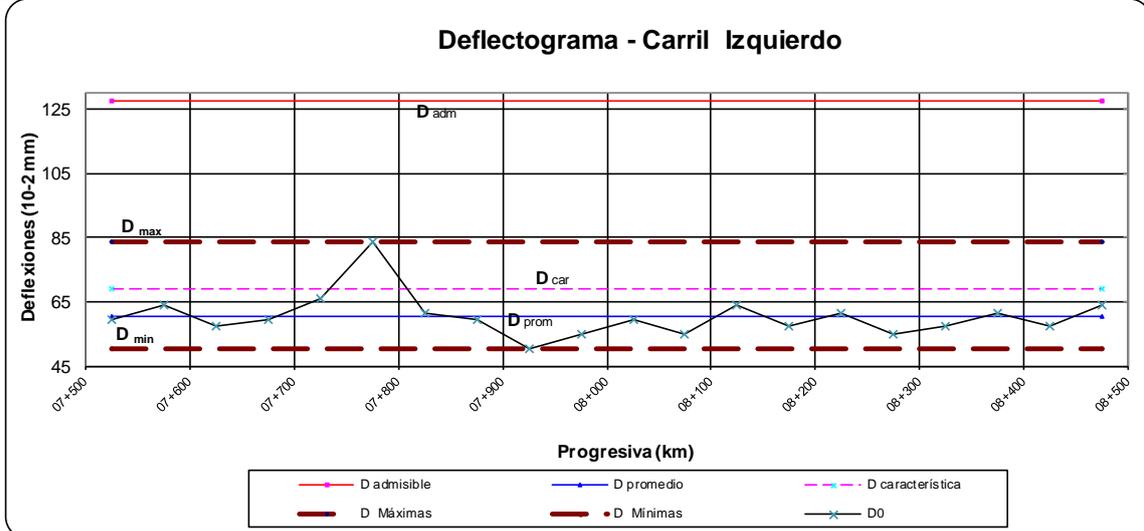
Cálculos	
Deflexiones (x10⁻² mm)	Radio de Curvatura (m)
$D_m = 61.38$ $\sigma = 11.55$	$R_{C(75,0\%)} = 157.83$
$D_c = D_m + 1.282 \times \sigma = 76.19$	$R_{medio} = 162$

CROQUIS



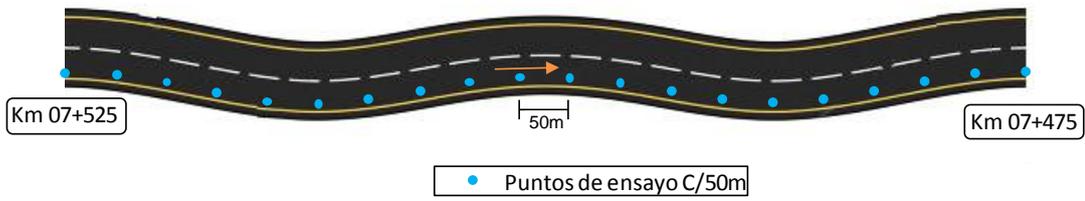
EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO POR DEFLECTOMETRÍA E ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DE LA CARRETERA: PUNO – VILQUE – MAÑAZO - 4KM CRÍTICOS - 2015

SECTOR : Km. 07+525 - 08+475 Estructura: BASE GRANULAR/CARPETA



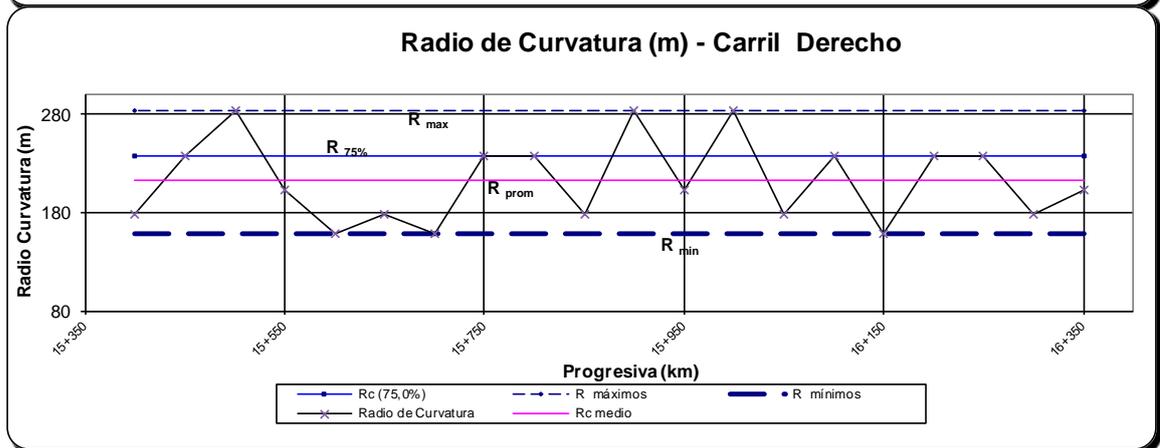
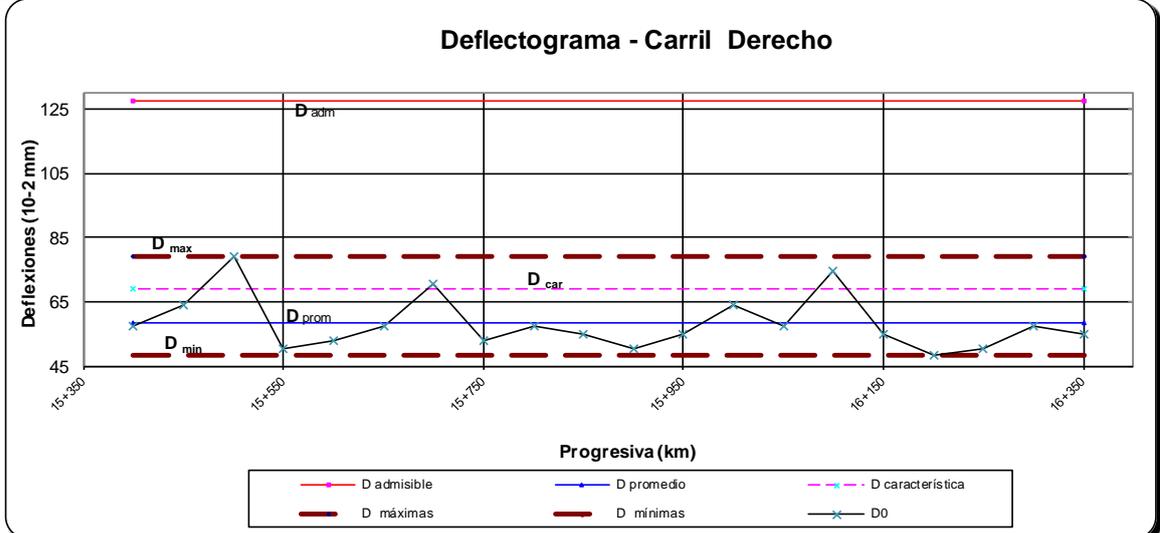
Cálculos	
Deflexiones (x10⁻² mm)	Radio de Curvatura (m)
D _m = 60.39 σ = 6.64	R _{C(75,0%)} = 202.92
D _C = D _m + 1.282 x σ = 68.90	R _{medio} = 177.59

CROQUIS



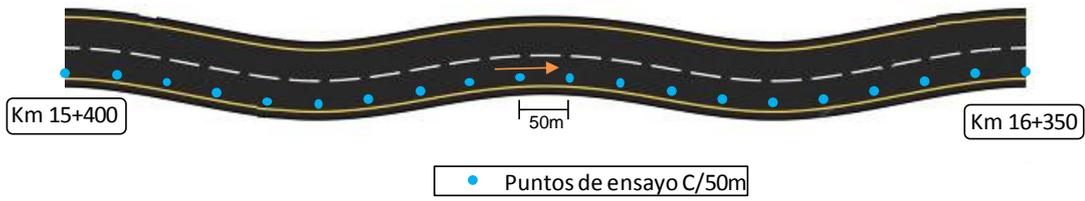
EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO POR DEFLECTOMETRÍA E ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DE LA CARRETERA: PUNO – VILQUE – MAÑAZO - 4KM CRÍTICOS - 2015

SECTOR : Km. 15+400 - 16+350 Estructura: BASE GRANULAR/CARPETA



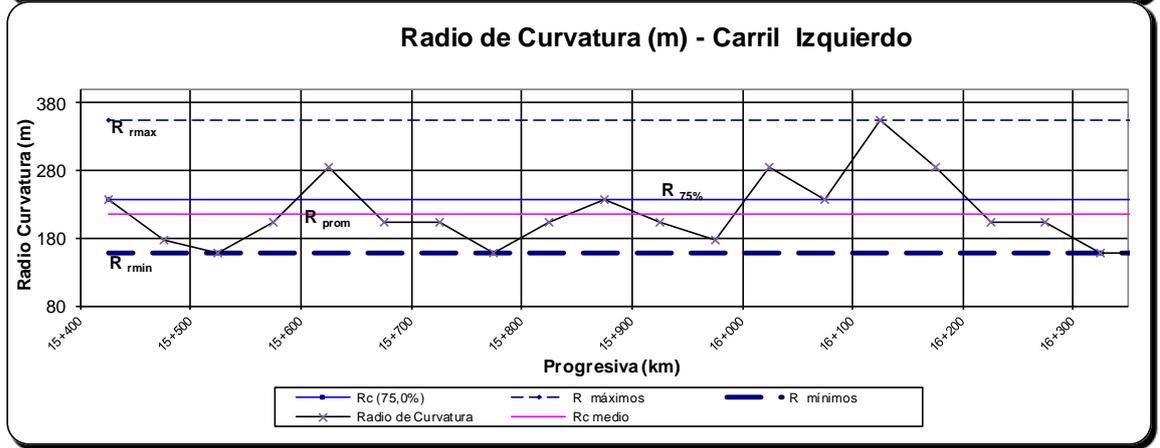
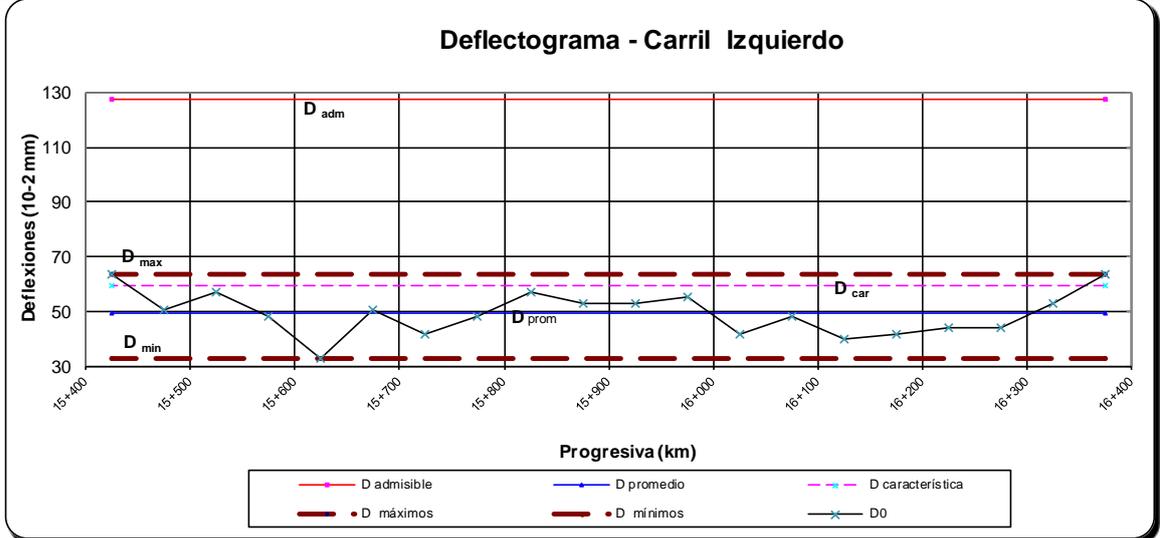
Cálculos	
Deflexiones (x10⁻² mm)	Radio de Curvatura (m)
$D_m = 58.19$ $\sigma = 8.28$	$R_{C(75,0\%)} = 236.74$
$D_c = D_m + 1.282 \times \sigma = 68.80$	$R_{medio} = 212.14$

CROQUIS



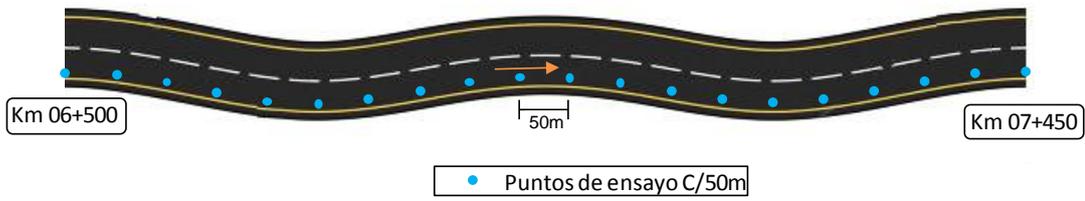
EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO POR DEFLECTOMETRÍA E ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DE LA CARRETERA: PUNO – VILQUE – MAÑAZO - 4KM CRÍTICOS - 2015

SECTOR : Km. 15+425 - 16+375 Estructura: BASE GRANULAR/CARPETA



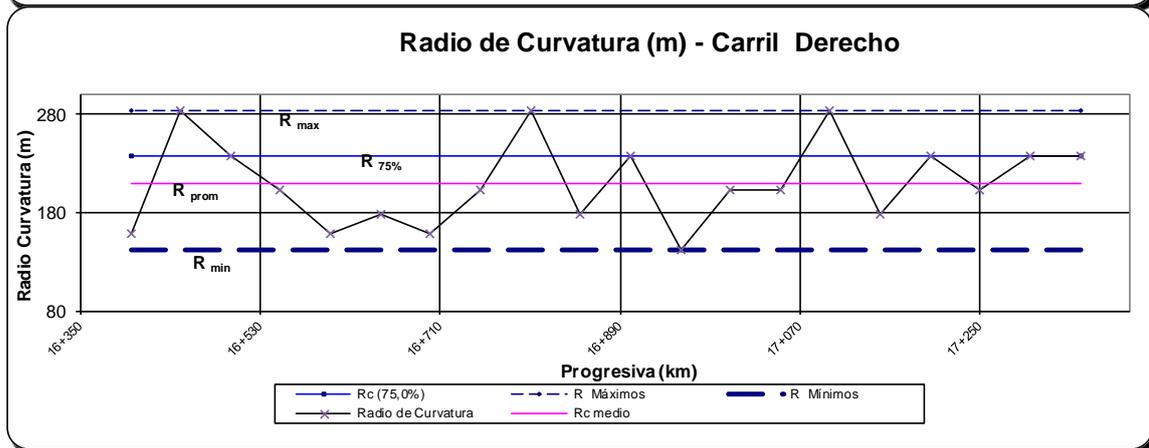
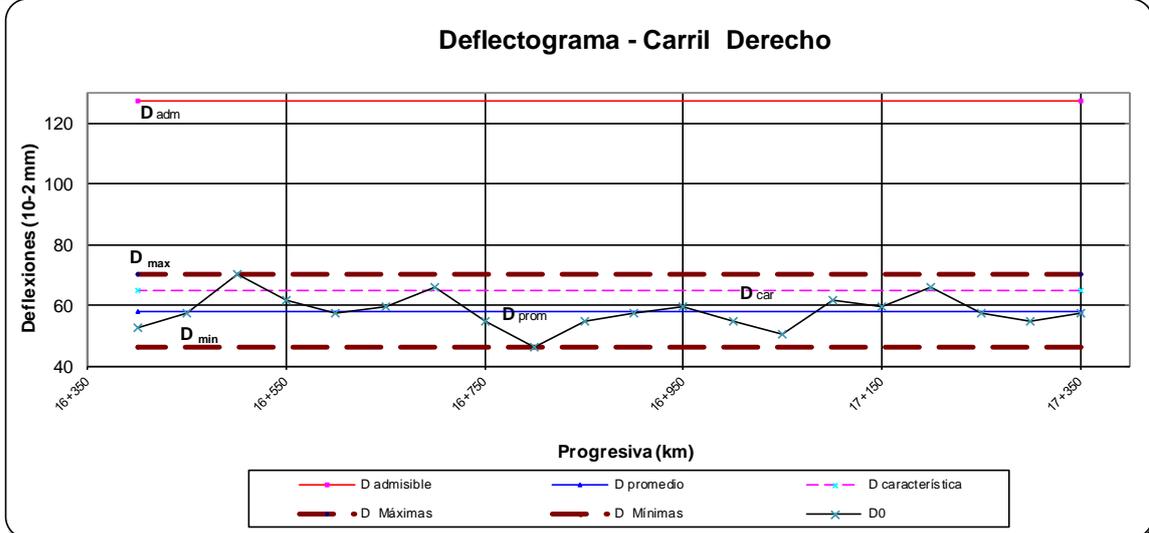
Cálculos	
Deflexiones ($\times 10^{-2}$ mm)	Radio de Curvatura (m)
$D_m = 49.39$ $\sigma = 7.96$	$R_{C(75,0\%)} = 236.74$
$D_c = D_m + 1.282 \times \sigma = 59.60$	$R_{medio} = 216$

CROQUIS



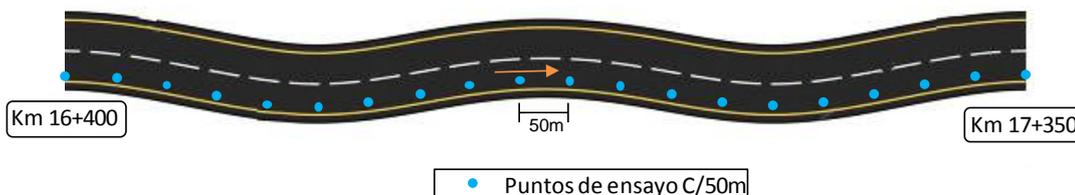
EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO POR DEFLECTOMETRÍA E ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DE LA CARRETERA: PUNO – VILQUE – MAÑAZO - 4KM CRÍTICOS - 2015

SECTOR : Km. 16+400 - 17+400 Estructura: BASE GRANULAR/CARPETA



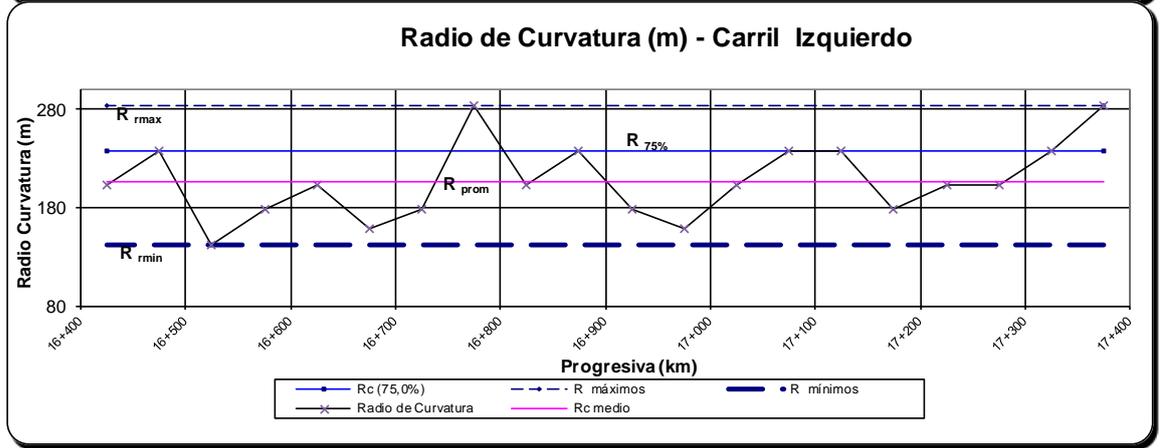
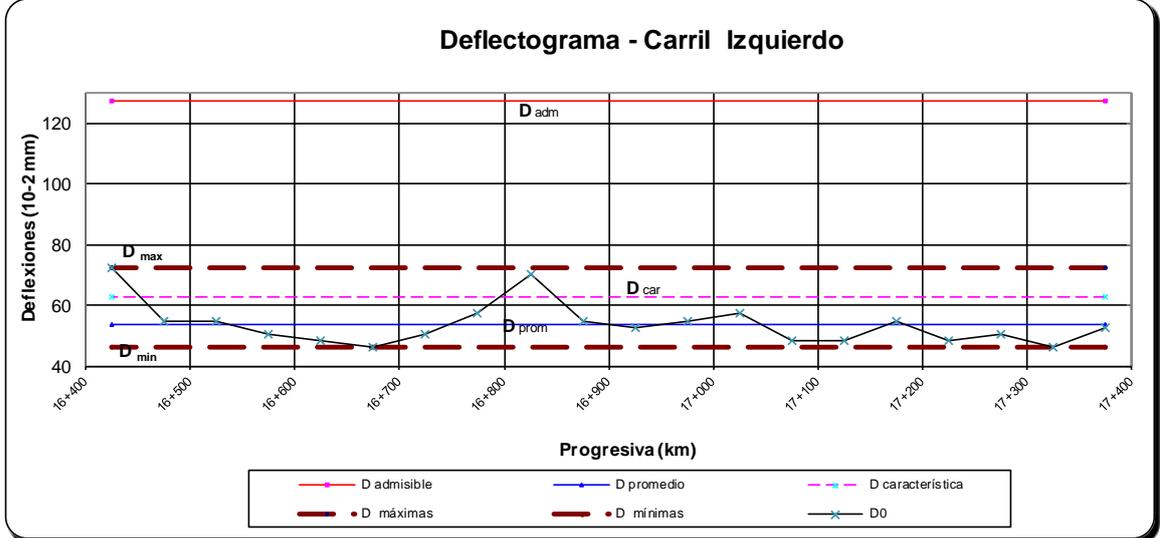
Cálculos	
Deflexiones ($\times 10^{-2}$ mm)	Radio de Curvatura (m)
$D_m = 57.97$ $\sigma = 5.50$	$R_{C(75,0\%)} = 236.74$
$D_c = D_m + 1.282 \times \sigma = 65.02$	$R_{medio} = 209.94$

CROQUIS



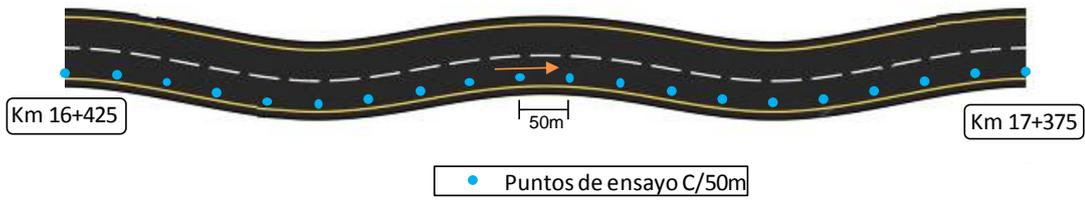
EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO POR DEFLECTOMETRÍA E ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DE LA CARRETERA: PUNO – VILQUE – MAÑAZO - 4KM CRÍTICOS - 2015

SECTOR : Km. 16+425 - 17+375 Estructura: BASE GRANULAR/CARPETA



Cálculos	
Deflexiones (x10⁻² mm) D _m = 53.79 σ = 6.97 D _c = D _m + 1.282 x σ = 62.73	Radio de Curvatura (m) R _{C(75,0%)} = 236.74 R _{medio} = 207

CROQUIS



4.3.2 RESUMEN DEFLECTOMÉTRICO DE LOS RESULTADOS

En el siguiente cuadro se presentan la síntesis de los ensayos deflectométricos con la Viga Benkelman.

Tabla 38: RESUMEN DEFLECTOMÉTRICO PRIMER TRAMO CRÍTICO.

SECCIÓN	PROGRESIVA		DEFLEXIÓN Y RADIO DE CURVA							
	INICIO	FINAL	CARRIL DERECHO				CARRIL IZQUIERDO			
			D0 PROM.	D25 PROM.	D' CARACTERÍSTICA	RADIO DE CURVA	D0 PROM.	D25 PROM.	D' CARACTERÍSTICA	RADIO DE CURVA
TRAMO Km. 06+500 AL Km. 08+500	06+500	07+500	56.76	40.92	66.85	213.41	58.63	41.58	70.88	188.86
	07+500	08+500	61.38	41.80	76.19	161.97	60.39	42.46	68.90	177.59
PROMEDIO			59.07	41.36	71.52	187.69	59.51	42.02	69.89	183.23

Tabla 39: RESUMEN DEFLECTOMÉTRICO SEGUNDO TRAMO CRÍTICO.

SECCIÓN	PROGRESIVA		DEFLEXIÓN Y RADIO DE CURVA							
	INICIO	FINAL	CARRIL DERECHO				CARRIL IZQUIERDO			
			D0 PROM.	D25 PROM.	D' CARACTERÍSTICA	RADIO DE CURVA	D0 PROM.	D25 PROM.	D' CARACTERÍSTICA	RADIO DE CURVA
TRAMO Km. 15+400 AL Km. 17+400	15+400	16+400	58.19	42.90	68.80	212.14	49.39	34.21	59.60	216.22
	16+400	17+400	57.97	42.46	65.02	209.94	53.79	38.17	62.73	206.87
PROMEDIO			58.08	42.68	66.91	211.04	51.59	36.19	61.17	211.55

Tabla 40: RESUMEN DEFLECTOMÉTRICO CARRIL DERECHO (4KM).

SECCIÓN	PROGRESIVA		DEFLEXIÓN Y RADIO DE CURVA							
	INICIO	FINAL	CARRIL DERECHO							
			D0 PROM	D25 PROM	D50 PROM	D75 PROM	D100 PROM	D' CARACTERÍSTICA	RADIO DE CURVA	
TRAMO Km. 06+500 AL Km. 08+500	06+500	07+500	56.76	40.92	24.86	16.39	10.01	66.85	213.41	
	07+500	08+500	61.38	41.80	25.52	14.41	6.60	76.19	161.97	
TRAMO Km. 15+400 AL Km. 17+400	15+400	16+400	58.19	42.90	27.39	15.40	7.26	68.80	212.14	
	16+400	17+400	57.97	42.46	25.52	14.41	6.05	65.02	209.94	
PROMEDIO			58.57	42.02	25.82	15.15	7.48	69.22	199.37	

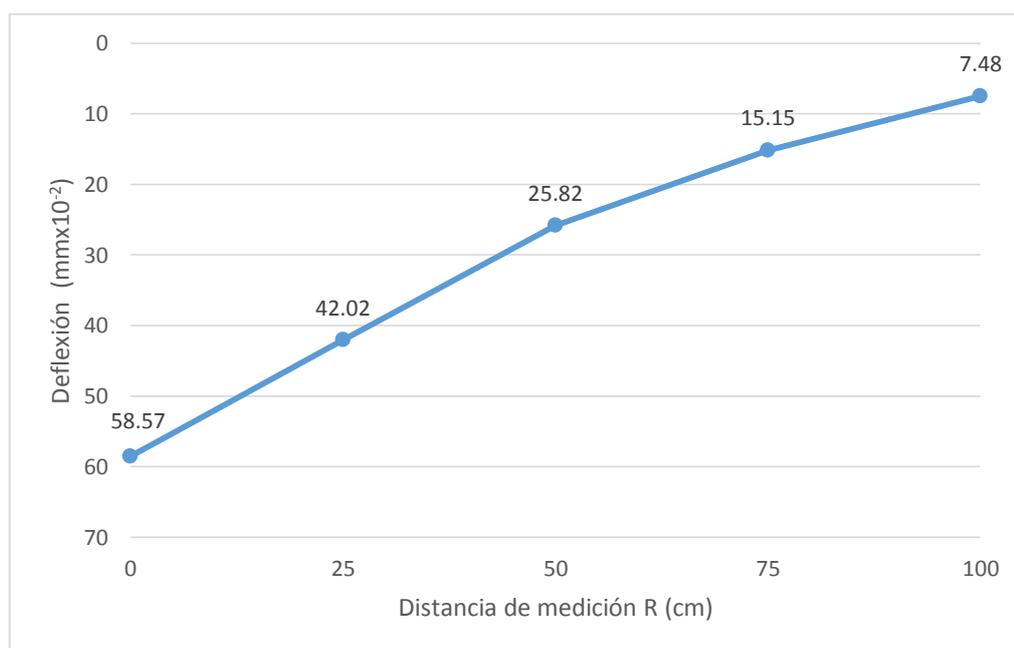


Gráfico 33: CLASIFICACIÓN DEFLEXIÓN VS DISTANCIA DE MEDICIÓN CARRIL DERECHO (4KM).

Tabla 41: RESUMEN DEFLECTOMÉTRICO CARRIL IZQUIERDO (4KM).

SECCIÓN	PROGRESIVA		DEFLEXIÓN Y RADIO DE CURVA						
	INICIO	FINAL	CARRIL IZQUIERDO						
			D0 PROM.	D25 PROM.	D50 PROM.	D75 PROM.	D100 PROM.	D' CARACTERÍSTICA	RADIO DE CURVA
TRAMO Km. 06+500 AL Km. 08+500	06+500	07+500	58.63	41.58	25.52	13.97	6.60	70.88	188.86
	07+500	08+500	60.39	42.46	27.50	16.17	8.03	68.90	177.59
TRAMO Km. 15+400 AL Km. 17+400	15+400	16+400	49.39	34.21	20.90	11.77	6.49	59.60	216.22
	16+400	17+400	53.79	38.17	22.44	11.99	5.28	62.73	206.87
PROMEDIO			55.55	39.11	24.09	13.48	6.60	65.53	197.39

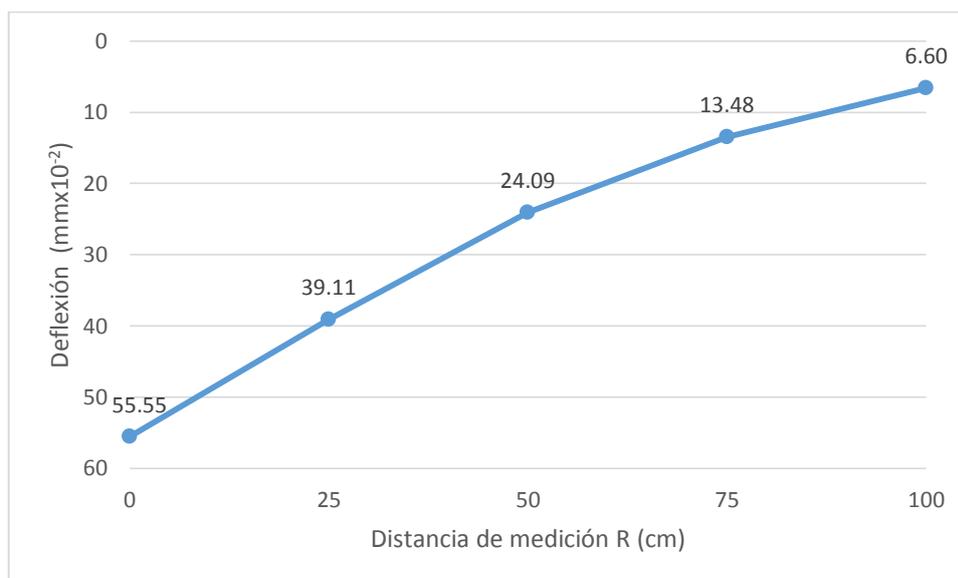


Gráfico 34: DEFLEXIÓN VS DISTANCIA DE MEDICIÓN CARRIL IZQUIERDO (4KM).

Las deflexiones características y admisibles, se compararon mediante un análisis combinado de los resultados de la evaluación, se puede decir lo siguiente:

Para los tramos que comprenden los cuatro (04) kilómetros más críticos: Km 06+500 al Km 08+500 y km 15+400 al km 17+400 la deflexión característica es baja en ambos carriles, (menores la deflexión admisible $127.5 \times 10^2 \text{ mm}$), por lo tanto, se puede deducir que el suelo que compone la estructura del pavimento evaluado se encuentra en buen estado, tanto en las capas superiores como en las inferiores, ya que están de acuerdo a los requerimientos de calidad referidos a los controles deflectométricos.

También cabe mencionar que el valor de radio de curvatura en los cuatro (04) km más críticos: Km 06+500 al Km 08+500 y Km 15+400 al Km 17+400 en ambos carriles, superan los 80m estipulados como valor mínimo, según la norma del Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”, es decir, cumple con este requerimiento.

4.4 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN POR EL MÉTODO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL IRI

La regularidad de un pavimento es el parámetro que relaciona la magnitud y frecuencia de las irregularidades superficiales o altimétricas, con la comodidad o confort al transitar sobre él. La unidad de medición de rugosidad que se emplea en el Perú es el IRI (International Roughness Index- Índice de Rugosidad Internacional), parámetro desarrollado por el Banco Mundial para uniformizar los diversos criterios que existen para medir y calibrar la rugosidad de los pavimentos.

4.4.1 ENSAYOS REALIZADOS CON EL RUGOSÍMETRO MERLIN

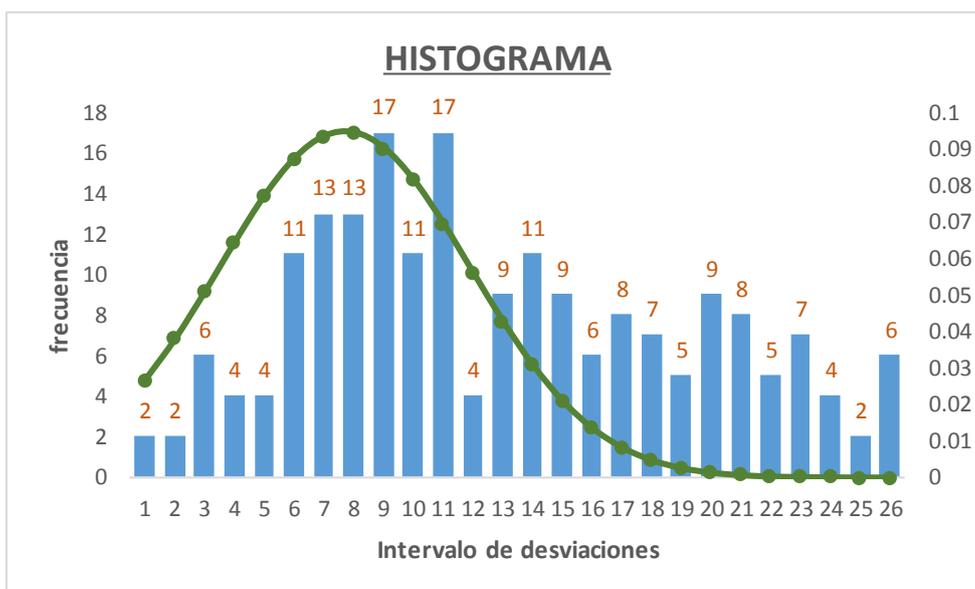
Los formatos con los datos de campo se encuentran en el anexo E. A continuación se presentan los histogramas de frecuencias de los ensayos realizados:

HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 06+500 al KM 06+900 L/D.

Intervalo de desviacion	frecuencia								
1	0	11	0	21	2	31	17	41	8
2	0	12	0	22	2	32	4	42	5
3	0	13	0	23	6	33	9	43	7
4	0	14	0	24	4	34	11	44	4
5	0	15	0	25	4	35	9	45	2
6	0	16	0	26	11	36	6	46	6
7	0	17	0	27	13	37	8	47	0
8	0	18	0	28	13	38	7	48	0
9	0	19	0	29	17	39	5	49	0
10	0	20	0	30	11	40	9	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	21	2	10	30	11	19	39	5
2	22	2	11	31	17	20	40	9
3	23	6	12	32	4	21	41	8
4	24	4	13	33	9	22	42	5
5	25	4	14	34	11	23	43	7
6	26	11	15	35	9	24	44	4
7	27	13	16	36	6	25	45	2
8	28	13	17	37	8	26	46	6
9	29	17	18	38	7	27	47	0

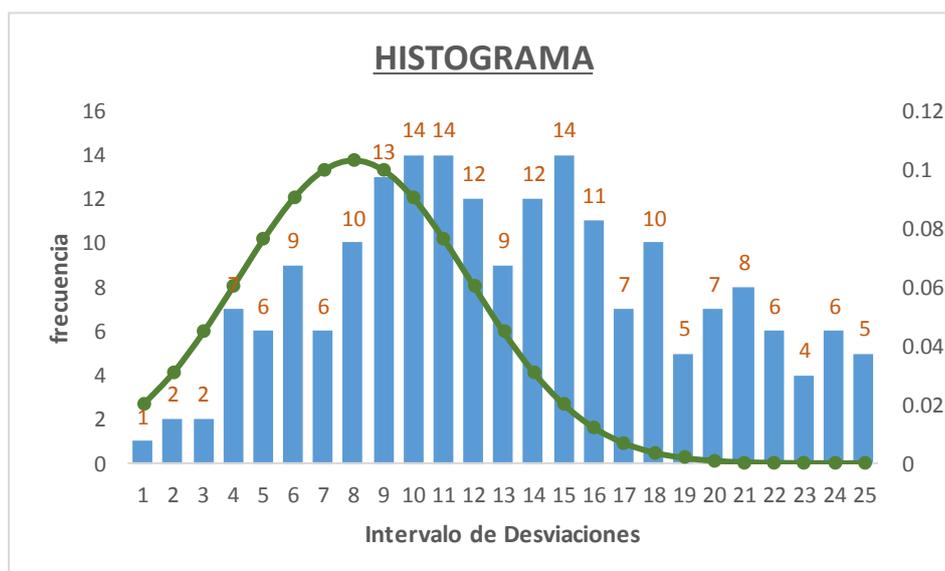


HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 06+500 AL KM 06+900 L/I.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	2	31	12	41	6
2	0	12	0	22	2	32	9	42	4
3	0	13	0	23	7	33	12	43	6
4	0	14	0	24	6	34	14	44	5
5	0	15	0	25	9	35	11	45	0
6	0	16	0	26	6	36	7	46	0
7	0	17	0	27	10	37	10	47	0
8	0	18	0	28	13	38	5	48	0
9	0	19	0	29	14	39	7	49	0
10	0	20	1	30	14	40	8	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	20	1	10	29	14	19	38	5
2	21	2	11	30	14	20	39	7
3	22	2	12	31	12	21	40	8
4	23	7	13	32	9	22	41	6
5	24	6	14	33	12	23	42	4
6	25	9	15	34	14	24	43	6
7	26	6	16	35	11	25	44	5
8	27	10	17	36	7	26	45	0
9	28	13	18	37	10	27	46	0



HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS
KM 06+900 AL KM 07+300 L/D.

Intervalo de desviacion	frecuencia								
1	0	11	0	21	4	31	10	41	6
2	0	12	0	22	5	32	4	42	4
3	0	13	0	23	9	33	8	43	0
4	0	14	0	24	10	34	11	44	0
5	0	15	0	25	6	35	13	45	0
6	0	16	0	26	16	36	6	46	0
7	0	17	2	27	7	37	11	47	0
8	0	18	3	28	15	38	5	48	0
9	0	19	5	29	10	39	6	49	0
10	0	20	7	30	11	40	6	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	17	2	10	26	16	19	35	13
2	18	3	11	27	7	20	36	6
3	19	5	12	28	15	21	37	11
4	20	7	13	29	10	22	38	5
5	21	4	14	30	11	23	39	6
6	22	5	15	31	10	24	40	6
7	23	9	16	32	4	25	41	6
8	24	10	17	33	8	26	42	4
9	25	6	18	34	11	27	43	0

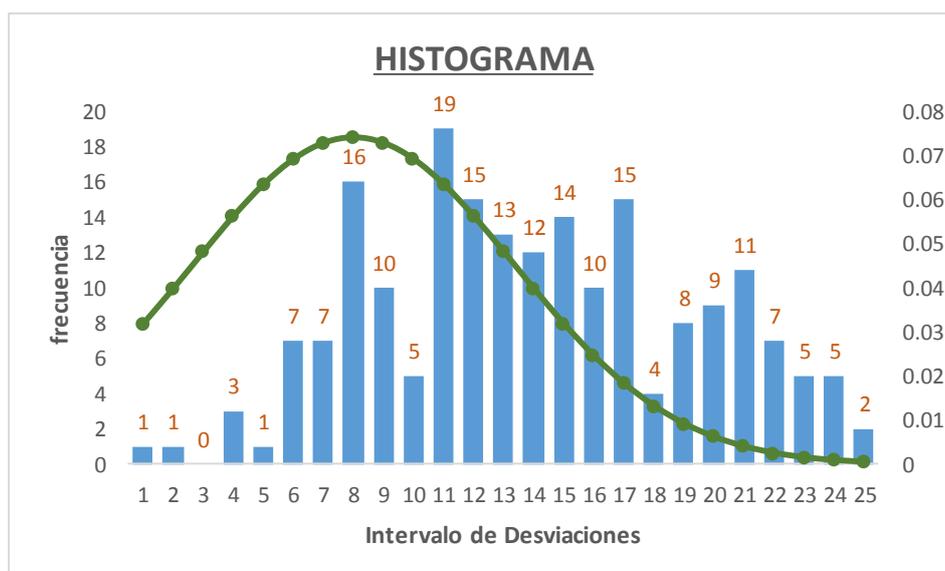


HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 06+900 AL KM 07+300 L/I.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	1	31	14	41	2
2	0	12	0	22	7	32	10	42	0
3	0	13	0	23	7	33	15	43	0
4	0	14	0	24	16	34	4	44	0
5	0	15	0	25	10	35	8	45	0
6	0	16	0	26	5	36	9	46	0
7	0	17	1	27	19	37	11	47	0
8	0	18	1	28	15	38	7	48	0
9	0	19	0	29	13	39	5	49	0
10	0	20	3	30	12	40	5	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	17	1	10	26	5	19	35	8
2	18	1	11	27	19	20	36	9
3	19	0	12	28	15	21	37	11
4	20	3	13	29	13	22	38	7
5	21	1	14	30	12	23	39	5
6	22	7	15	31	14	24	40	5
7	23	7	16	32	10	25	41	2
8	24	16	17	33	15	26	42	0
9	25	10	18	34	4	27	43	0

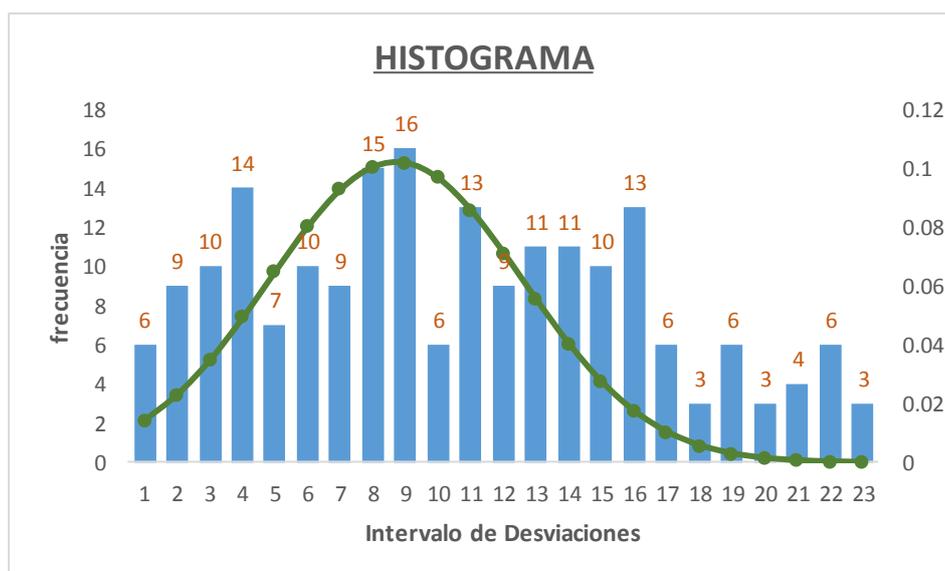


HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 07+300 AL KM 07+700 L/D.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	10	31	11	41	3
2	0	12	0	22	14	32	11	42	0
3	0	13	0	23	7	33	10	43	0
4	0	14	0	24	10	34	13	44	0
5	0	15	0	25	9	35	6	45	0
6	0	16	0	26	15	36	3	46	0
7	0	17	0	27	16	37	6	47	0
8	0	18	0	28	6	38	3	48	0
9	0	19	6	29	13	39	4	49	0
10	0	20	9	30	9	40	6	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	19	6	10	28	6	19	37	6
2	20	9	11	29	13	20	38	3
3	21	10	12	30	9	21	39	4
4	22	14	13	31	11	22	40	6
5	23	7	14	32	11	23	41	3
6	24	10	15	33	10	24	42	0
7	25	9	16	34	13	25	43	0
8	26	15	17	35	6	26	44	0
9	27	16	18	36	3	27	45	0

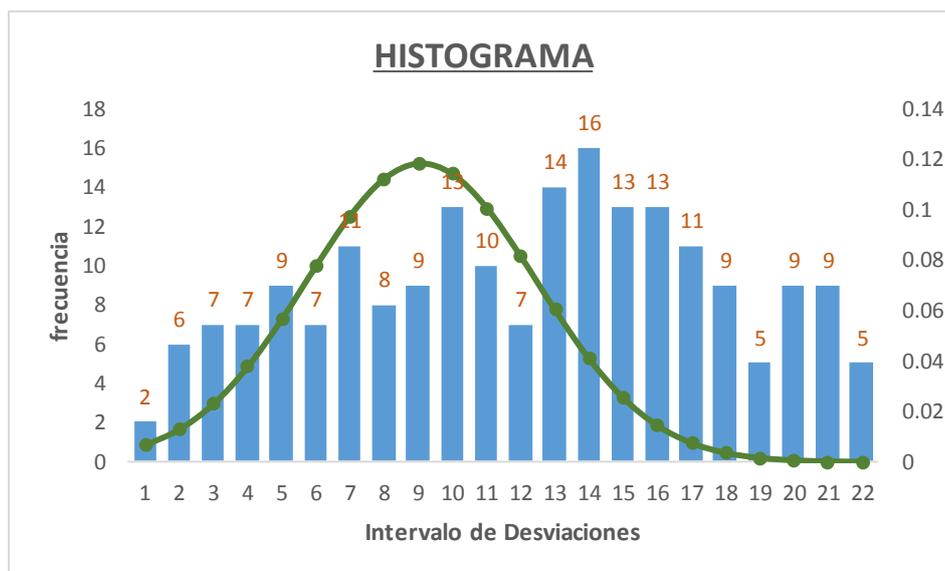


HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 07+300 AL KM 07+700 L/I.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	7	31	14	41	0
2	0	12	0	22	7	32	16	42	0
3	0	13	0	23	9	33	13	43	0
4	0	14	0	24	7	34	13	44	0
5	0	15	0	25	11	35	11	45	0
6	0	16	0	26	8	36	9	46	0
7	0	17	0	27	9	37	5	47	0
8	0	18	0	28	13	38	9	48	0
9	0	19	2	29	10	39	9	49	0
10	0	20	6	30	7	40	5	50	0

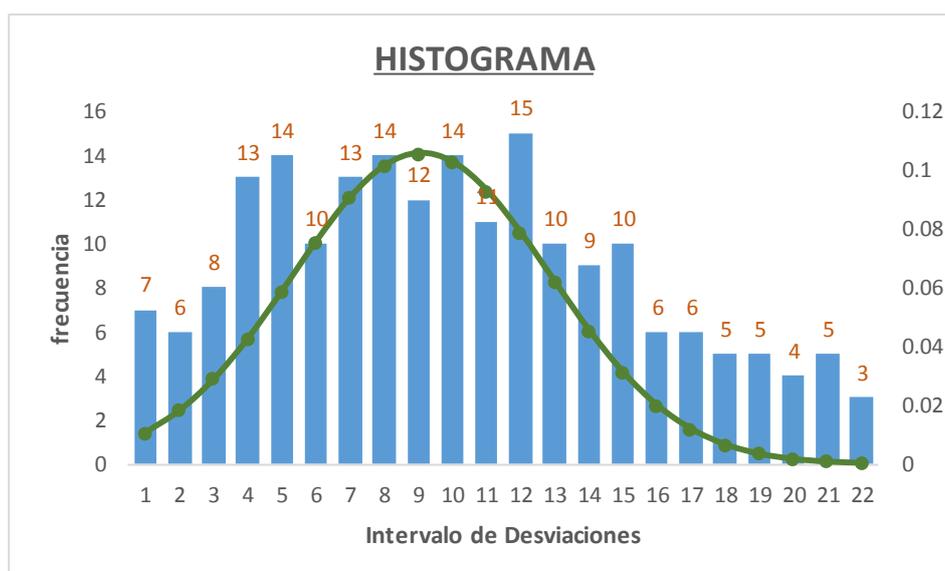
N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	19	2	10	28	13	19	37	5
2	20	6	11	29	10	20	38	9
3	21	7	12	30	7	21	39	9
4	22	7	13	31	14	22	40	5
5	23	9	14	32	16	23	41	0
6	24	7	15	33	13	24	42	0
7	25	11	16	34	13	25	43	0
8	26	8	17	35	11	26	44	0
9	27	9	18	36	9	27	45	0



HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS
KM 07+700 AL KM 08+100 L/D.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	6	31	15	41	3
2	0	12	0	22	8	32	10	42	0
3	0	13	0	23	13	33	9	43	0
4	0	14	0	24	14	34	10	44	0
5	0	15	0	25	10	35	6	45	0
6	0	16	0	26	13	36	6	46	0
7	0	17	0	27	14	37	5	47	0
8	0	18	0	28	12	38	5	48	0
9	0	19	0	29	14	39	4	49	0
10	0	20	7	30	11	40	5	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	20	7	10	29	14	19	38	5
2	21	6	11	30	11	20	39	4
3	22	8	12	31	15	21	40	5
4	23	13	13	32	10	22	41	3
5	24	14	14	33	9	23	42	0
6	25	10	15	34	10	24	43	0
7	26	13	16	35	6	25	44	0
8	27	14	17	36	6	26	45	0
9	28	12	18	37	5	27	46	0

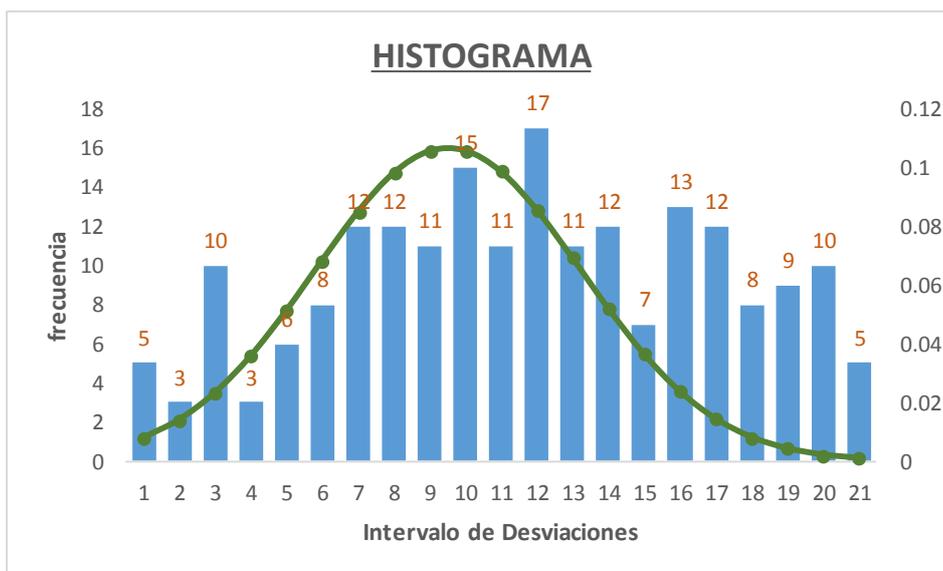


HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 07+700 AL KM 08+100 L/I.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	3	31	17	41	0
2	0	12	0	22	10	32	11	42	0
3	0	13	0	23	3	33	12	43	0
4	0	14	0	24	6	34	7	44	0
5	0	15	0	25	8	35	13	45	0
6	0	16	0	26	12	36	12	46	0
7	0	17	0	27	12	37	8	47	0
8	0	18	0	28	11	38	9	48	0
9	0	19	0	29	15	39	10	49	0
10	0	20	5	30	11	40	5	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	20	5	10	29	15	19	38	9
2	21	3	11	30	11	20	39	10
3	22	10	12	31	17	21	40	5
4	23	3	13	32	11	22	41	0
5	24	6	14	33	12	23	42	0
6	25	8	15	34	7	24	43	0
7	26	12	16	35	13	25	44	0
8	27	12	17	36	12	26	45	0
9	28	11	18	37	8	27	46	0

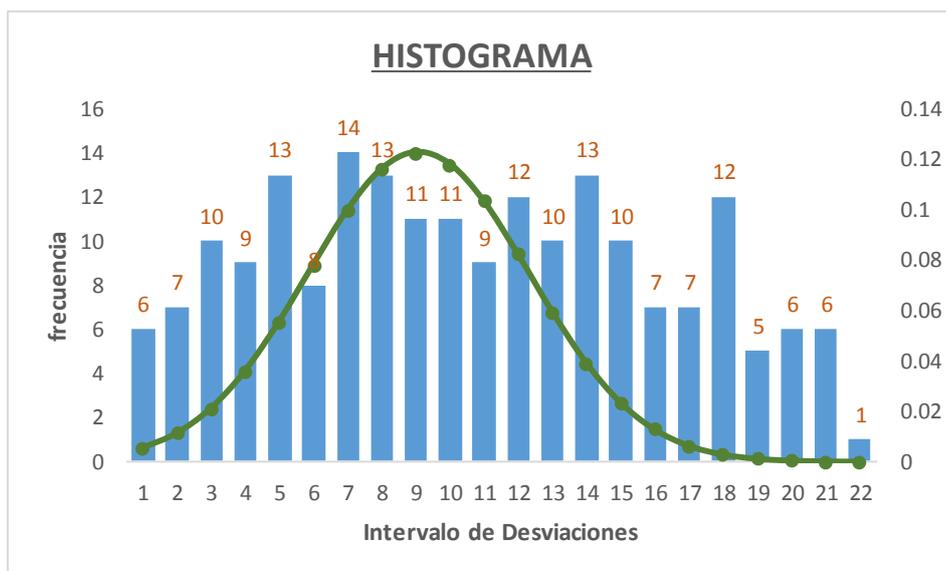


HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 08+100 AL KM 08+500 L/D.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	7	31	12	41	1
2	0	12	0	22	10	32	10	42	0
3	0	13	0	23	9	33	13	43	0
4	0	14	0	24	13	34	10	44	0
5	0	15	0	25	8	35	7	45	0
6	0	16	0	26	14	36	7	46	0
7	0	17	0	27	13	37	12	47	0
8	0	18	0	28	11	38	5	48	0
9	0	19	0	29	11	39	6	49	0
10	0	20	6	30	9	40	6	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	20	6	10	29	11	19	38	5
2	21	7	11	30	9	20	39	6
3	22	10	12	31	12	21	40	6
4	23	9	13	32	10	22	41	1
5	24	13	14	33	13	23	42	0
6	25	8	15	34	10	24	43	0
7	26	14	16	35	7	25	44	0
8	27	13	17	36	7	26	45	0
9	28	11	18	37	12	27	46	0



HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 08+100 AL KM 08+500 L/I.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	8	31	7	41	6
2	0	12	0	22	10	32	11	42	0
3	0	13	0	23	14	33	9	43	0
4	0	14	0	24	11	34	6	44	0
5	0	15	0	25	11	35	9	45	0
6	0	16	0	26	8	36	10	46	0
7	0	17	0	27	14	37	5	47	0
8	0	18	0	28	14	38	9	48	0
9	0	19	6	29	9	39	4	49	0
10	0	20	8	30	9	40	2	50	0

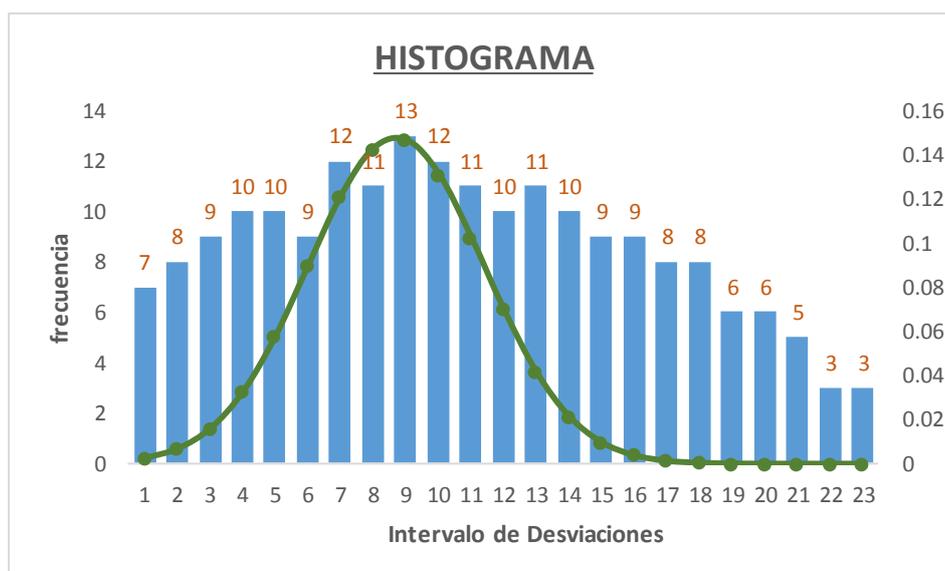
N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	19	6	10	28	14	19	37	5
2	20	8	11	29	9	20	38	9
3	21	8	12	30	9	21	39	4
4	22	10	13	31	7	22	40	2
5	23	14	14	32	11	23	41	6
6	24	11	15	33	9	24	42	0
7	25	11	16	34	6	25	43	0
8	26	8	17	35	9	26	44	0
9	27	14	18	36	10	27	45	0



HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS
KM 15+400 AL KM 15+800 L/D.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	8	31	10	41	3
2	0	12	0	22	9	32	11	42	3
3	0	13	0	23	10	33	10	43	0
4	0	14	0	24	10	34	9	44	0
5	0	15	0	25	9	35	9	45	0
6	0	16	0	26	12	36	8	46	0
7	0	17	0	27	11	37	8	47	0
8	0	18	0	28	13	38	6	48	0
9	0	19	0	29	12	39	6	49	0
10	0	20	7	30	11	40	5	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	20	7	10	29	12	19	38	6
2	21	8	11	30	11	20	39	6
3	22	9	12	31	10	21	40	5
4	23	10	13	32	11	22	41	3
5	24	10	14	33	10	23	42	3
6	25	9	15	34	9	24	43	0
7	26	12	16	35	9	25	44	0
8	27	11	17	36	8	26	45	0
9	28	13	18	37	8	27	46	0

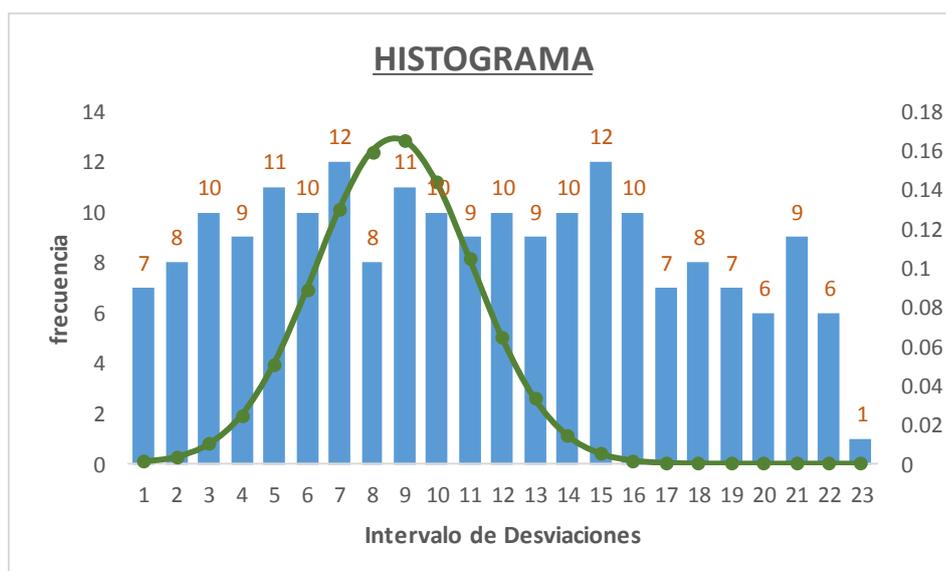


HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 15+400 AL KM 15+800 L/I.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	8	31	10	41	6
2	0	12	0	22	10	32	9	42	1
3	0	13	0	23	9	33	10	43	0
4	0	14	0	24	11	34	12	44	0
5	0	15	0	25	10	35	10	45	0
6	0	16	0	26	12	36	7	46	0
7	0	17	0	27	8	37	8	47	0
8	0	18	0	28	11	38	7	48	0
9	0	19	0	29	10	39	6	49	0
10	0	20	7	30	9	40	9	50	0

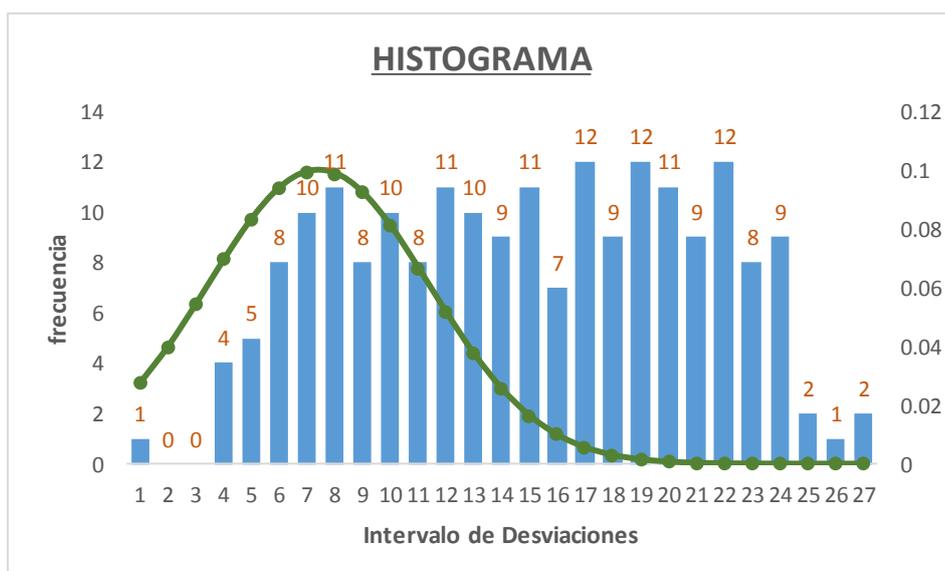
N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	20	7	10	29	10	19	38	7
2	21	8	11	30	9	20	39	6
3	22	10	12	31	10	21	40	9
4	23	9	13	32	9	22	41	6
5	24	11	14	33	10	23	42	1
6	25	10	15	34	12	24	43	0
7	26	12	16	35	10	25	44	0
8	27	8	17	36	7	26	45	0
9	28	11	18	37	8	27	46	0



HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS
KM 15+800 AL KM 16+200 L/D.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	8	31	7	41	1
2	0	12	0	22	10	32	12	42	2
3	0	13	0	23	11	33	9	43	0
4	0	14	0	24	8	34	12	44	0
5	0	15	0	25	10	35	11	45	0
6	0	16	1	26	8	36	9	46	0
7	0	17	0	27	11	37	12	47	0
8	0	18	0	28	10	38	8	48	0
9	0	19	4	29	9	39	9	49	0
10	0	20	5	30	11	40	2	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	16	1	10	25	10	19	34	12
2	17	0	11	26	8	20	35	11
3	18	0	12	27	11	21	36	9
4	19	4	13	28	10	22	37	12
5	20	5	14	29	9	23	38	8
6	21	8	15	30	11	24	39	9
7	22	10	16	31	7	25	40	2
8	23	11	17	32	12	26	41	1
9	24	8	18	33	9	27	42	2

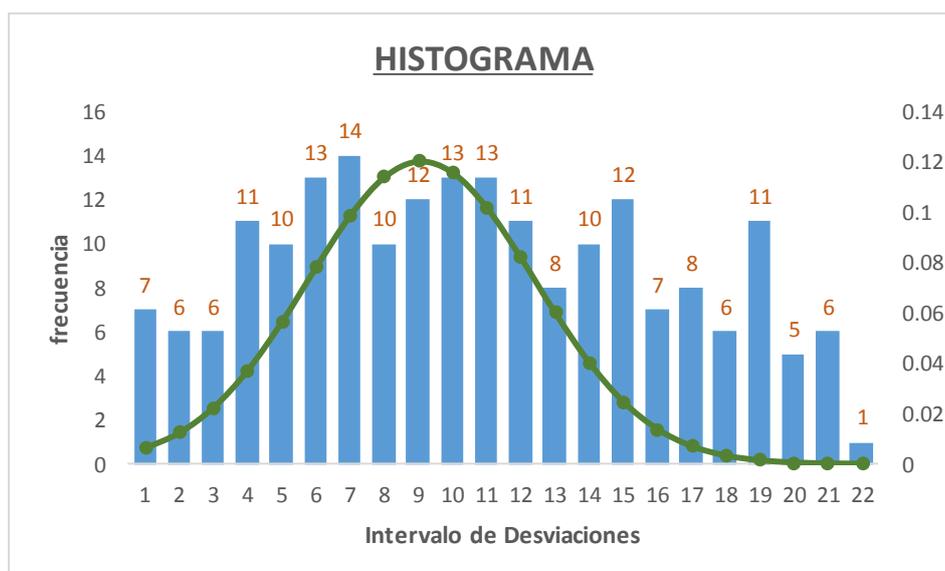


HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 15+800 AL KM 16+200 L/I.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	6	31	8	41	0
2	0	12	0	22	11	32	10	42	0
3	0	13	0	23	10	33	12	43	0
4	0	14	0	24	13	34	7	44	0
5	0	15	0	25	14	35	8	45	0
6	0	16	0	26	10	36	6	46	0
7	0	17	0	27	12	37	11	47	0
8	0	18	0	28	13	38	5	48	0
9	0	19	7	29	13	39	6	49	0
10	0	20	6	30	11	40	1	50	0

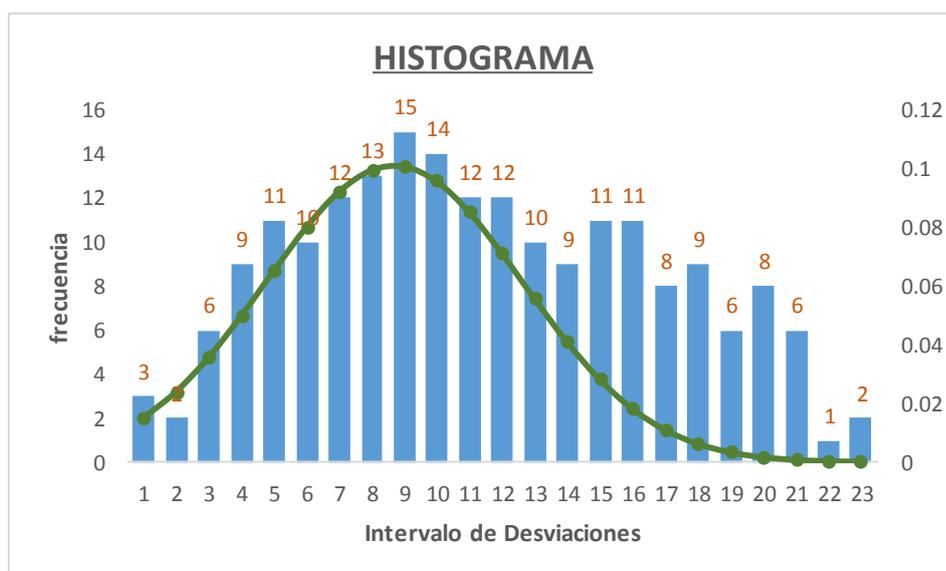
N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	19	7	10	28	13	19	37	11
2	20	6	11	29	13	20	38	5
3	21	6	12	30	11	21	39	6
4	22	11	13	31	8	22	40	1
5	23	10	14	32	10	23	41	0
6	24	13	15	33	12	24	42	0
7	25	14	16	34	7	25	43	0
8	26	10	17	35	8	26	44	0
9	27	12	18	36	6	27	45	0



HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS
KM 16+200 AL KM 16+600 L/D.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	9	31	9	41	0
2	0	12	0	22	11	32	11	42	0
3	0	13	0	23	10	33	11	43	0
4	0	14	0	24	12	34	8	44	0
5	0	15	0	25	13	35	9	45	0
6	0	16	0	26	15	36	6	46	0
7	0	17	0	27	14	37	8	47	0
8	0	18	3	28	12	38	6	48	0
9	0	19	2	29	12	39	1	49	0
10	0	20	6	30	10	40	2	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	18	3	10	27	14	19	36	6
2	19	2	11	28	12	20	37	8
3	20	6	12	29	12	21	38	6
4	21	9	13	30	10	22	39	1
5	22	11	14	31	9	23	40	2
6	23	10	15	32	11	24	41	0
7	24	12	16	33	11	25	42	0
8	25	13	17	34	8	26	43	0
9	26	15	18	35	9	27	44	0

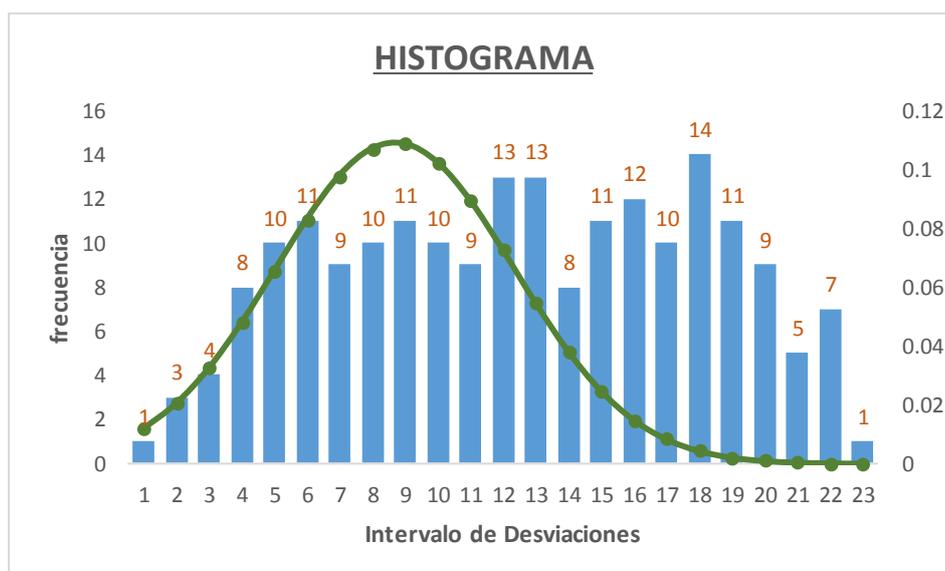


HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 16+200 AL KM 16+600 L/I.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	10	31	11	41	0
2	0	12	0	22	11	32	12	42	0
3	0	13	0	23	9	33	10	43	0
4	0	14	0	24	10	34	14	44	0
5	0	15	0	25	11	35	11	45	0
6	0	16	0	26	10	36	9	46	0
7	0	17	1	27	9	37	5	47	0
8	0	18	3	28	13	38	7	48	0
9	0	19	4	29	13	39	1	49	0
10	0	20	8	30	8	40	0	50	0

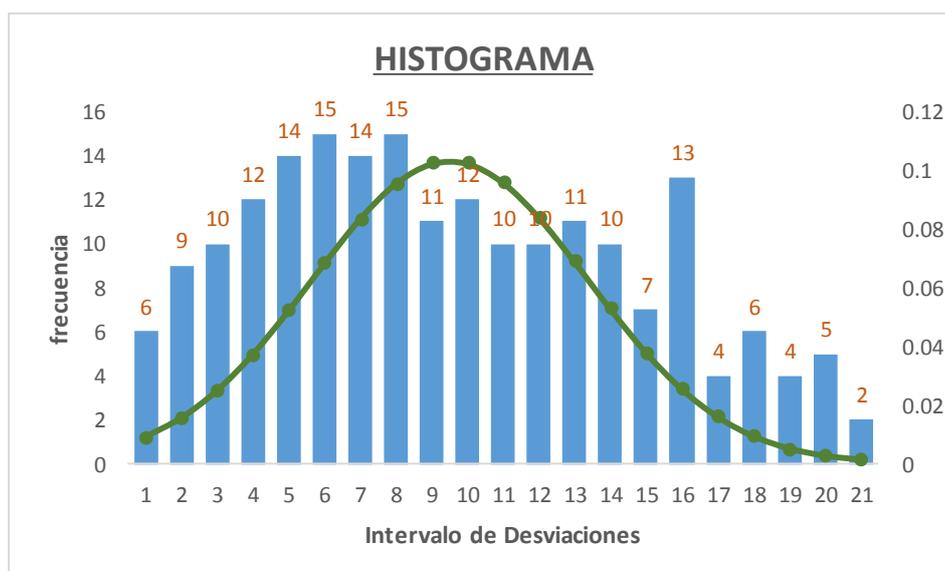
N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	17	1	10	26	10	19	35	11
2	18	3	11	27	9	20	36	9
3	19	4	12	28	13	21	37	5
4	20	8	13	29	13	22	38	7
5	21	10	14	30	8	23	39	1
6	22	11	15	31	11	24	40	0
7	23	9	16	32	12	25	41	0
8	24	10	17	33	10	26	42	0
9	25	11	18	34	14	27	43	0



HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS
KM 16+600 AL KM 17+000 L/D.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	9	31	10	41	0
2	0	12	0	22	10	32	11	42	0
3	0	13	0	23	12	33	10	43	0
4	0	14	0	24	14	34	7	44	0
5	0	15	0	25	15	35	13	45	0
6	0	16	0	26	14	36	4	46	0
7	0	17	0	27	15	37	6	47	0
8	0	18	0	28	11	38	4	48	0
9	0	19	0	29	12	39	5	49	0
10	0	20	6	30	10	40	2	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	20	6	10	29	12	19	38	4
2	21	9	11	30	10	20	39	5
3	22	10	12	31	10	21	40	2
4	23	12	13	32	11	22	41	0
5	24	14	14	33	10	23	42	0
6	25	15	15	34	7	24	43	0
7	26	14	16	35	13	25	44	0
8	27	15	17	36	4	26	45	0
9	28	11	18	37	6	27	46	0

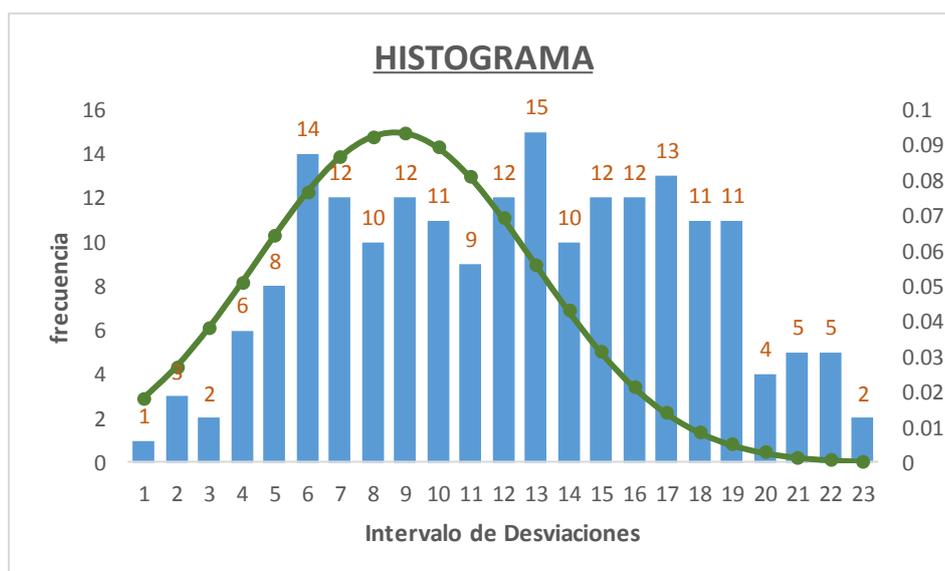


HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 16+600 AL KM 17+000 L/I.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	8	31	12	41	0
2	0	12	0	22	14	32	12	42	0
3	0	13	0	23	12	33	13	43	0
4	0	14	0	24	10	34	11	44	0
5	0	15	0	25	12	35	11	45	0
6	0	16	0	26	11	36	4	46	0
7	0	17	1	27	9	37	5	47	0
8	0	18	3	28	12	38	5	48	0
9	0	19	2	29	15	39	2	49	0
10	0	20	6	30	10	40	0	50	0

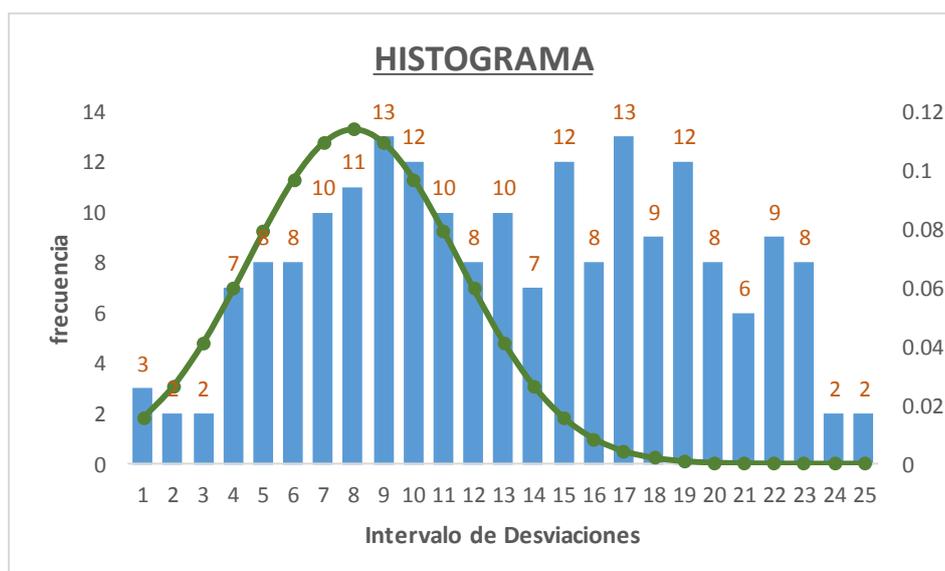
N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	17	1	10	26	11	19	35	11
2	18	3	11	27	9	20	36	4
3	19	2	12	28	12	21	37	5
4	20	6	13	29	15	22	38	5
5	21	8	14	30	10	23	39	2
6	22	14	15	31	12	24	40	0
7	23	12	16	32	12	25	41	0
8	24	10	17	33	13	26	42	0
9	25	12	18	34	11	27	43	0



HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS
KM 17+000 AL KM 17+400 L/D.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	8	31	12	41	2
2	0	12	0	22	8	32	8	42	0
3	0	13	0	23	10	33	13	43	0
4	0	14	0	24	11	34	9	44	0
5	0	15	0	25	13	35	12	45	0
6	0	16	0	26	12	36	8	46	0
7	0	17	3	27	10	37	6	47	0
8	0	18	2	28	8	38	9	48	0
9	0	19	2	29	10	39	8	49	0
10	0	20	7	30	7	40	2	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	17	3	10	26	12	19	35	12
2	18	2	11	27	10	20	36	8
3	19	2	12	28	8	21	37	6
4	20	7	13	29	10	22	38	9
5	21	8	14	30	7	23	39	8
6	22	8	15	31	12	24	40	2
7	23	10	16	32	8	25	41	2
8	24	11	17	33	13	26	42	0
9	25	13	18	34	9	27	43	0

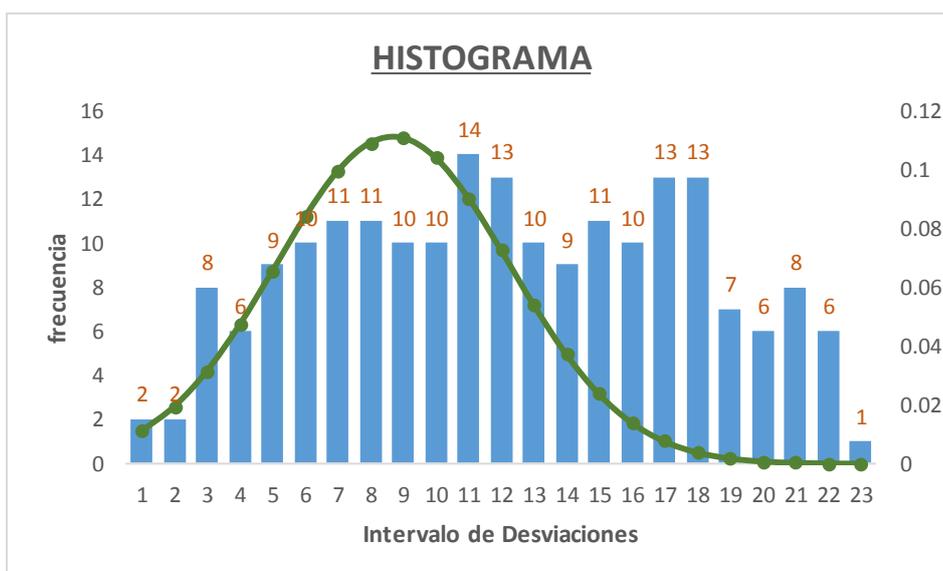


HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

KM 17+000 AL KM 17+400 L/I.

Intervalo de desviación	frecuencia								
1	0	11	0	21	6	31	9	41	0
2	0	12	0	22	9	32	11	42	0
3	0	13	0	23	10	33	10	43	0
4	0	14	0	24	11	34	13	44	0
5	0	15	0	25	11	35	13	45	0
6	0	16	0	26	10	36	7	46	0
7	0	17	0	27	10	37	6	47	0
8	0	18	2	28	14	38	8	48	0
9	0	19	2	29	13	39	6	49	0
10	0	20	8	30	10	40	1	50	0

N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia	N°	Intervalo de desviación	frecuencia
1	18	2	10	27	10	19	36	7
2	19	2	11	28	14	20	37	6
3	20	8	12	29	13	21	38	8
4	21	6	13	30	10	22	39	6
5	22	9	14	31	9	23	40	1
6	23	10	15	32	11	24	41	0
7	24	11	16	33	10	25	42	0
8	25	11	17	34	13	26	43	0
9	26	10	18	35	13	27	44	0



4.4.2 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE REGULARIDAD

En el siguiente cuadro se presentan la síntesis de los ensayos de regularidad con el rugosímetro Merlin.

Tabla 42: RESUMEN DE REGULARIDAD PRIMER TRAMO CRÍTICO.

SECCIÓN	PROGRESIVA		LONG. INTERVALO (m)	IRI (m/km)			
	INICIO	FINAL		CARRIL DERECHO		CARRIL IZQUIERDO	
				HUELLA DER.	HUELLA IZQ.	HUELLA DER.	HUELLA IZQ.
TRAMO Km. 06+500 AL Km. 08+500	06+500	06+900	400	5.20	-	-	4.96
	06+900	07+300	400	5.31	-	-	4.37
	07+300	07+700	400	4.93	-	-	4.67
	07+700	08+100	400	4.64	-	-	4.48
	08+100	08+500	400	4.62	-	-	4.86
PROMEDIO				4.94	-	-	4.67

Tabla 43: RESUMEN DE REGULARIDAD SEGUNDO TRAMO CRÍTICO.

SECCIÓN	PROGRESIVA		LONG. INTERVALO (m)	IRI (m/km)			
	INICIO	FINAL		CARRIL DERECHO		CARRIL IZQUIERDO	
				HUELLA DER.	HUELLA IZQ.	HUELLA DER.	HUELLA IZQ.
TRAMO Km. 15+400 AL Km. 17+400	15+400	15+800	400	4.82	-	-	4.93
	15+800	16+200	400	4.74	-	-	4.61
	16+200	16+600	400	4.42	-	-	4.49
	16+600	17+000	400	4.37	-	-	4.35
	17+000	17+400	400	4.82	-	-	4.61
PROMEDIO				4.63	-	-	4.60

Tabla 44: RESUMEN DE REGULARIDAD (4KM) MÁS CRÍTICOS.

SECCIÓN	PROGRESIVA		LONG. INTERVALO (m)	IRI (m/km)			
	INICIO	FINAL		CARRIL DERECHO		CARRIL IZQUIERDO	
				HUELLA DER.	HUELLA IZQ.	HUELLA DER.	HUELLA IZQ.
TRAMO Km. 06+500 AL Km. 08+500	06+500	06+900	400	5.20	-	-	4.96
	06+900	07+300	400	5.31	-	-	4.37
	07+300	07+700	400	4.93	-	-	4.67
	07+700	08+100	400	4.64	-	-	4.48
	08+100	08+500	400	4.62	-	-	4.86
TRAMO Km. 15+400 AL Km. 17+400	15+400	15+800	400	4.82	-	-	4.93
	15+800	16+200	400	4.74	-	-	4.61
	16+200	16+600	400	4.42	-	-	4.49
	16+600	17+000	400	4.37	-	-	4.35
	17+000	17+400	400	4.82	-	-	4.61
PROMEDIO				4.79	-	-	4.63

De acuerdo a la escala de regularidad IRI (ver gráfico 6, pág. 53), donde nos muestra la valoración de una vía de acuerdo a la rugosidad IRI (m/km). El pavimento objeto de la presente evaluación tiene un IRI comprendido entre 2.0 y 6.50, por consiguiente, la vía se encuentra en la valoración de un pavimento envejecido.

Para un pavimento existente, durante el periodo de servicio el Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”, Sección: Suelos y Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones recomienda el siguiente valor:

Carreteras de segunda clase con un IMDA 2000 a 401 veh/día, Durante el periodo de servicio. Le corresponde un IRI máximo admisible de 4.00 m/km.

En consecuencia, los valores de IRI durante el periodo de servicio en los dos (02) primeros kilómetros críticos son 4.94 y 4.67 m/km de los carriles derecho e izquierdo respectivamente, los cuales resultan ser mayores a la rugosidad admisible que estipula el manual (4 m/km).

Los valores de IRI durante el periodo de servicio en los dos (02) últimos kilómetros críticos son 4.63 y 4.60 m/km de los carriles derecho e izquierdo respectivamente, los cuales resultan ser mayores a la rugosidad admisible que estipula el manual (4m/km).

4.5 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL MATERIAL DE BASE MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO

Las muestras a ser ensayadas fueron extraídas mediante calicatas de la carretera objeto de la presente evaluación, específicamente en las progresivas: km 07+500 y km 16+400. Los resultados de los ensayos de laboratorio nos permitirán evaluar la calidad del material de base granular recurriendo para ello al Manual de Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras EG – 2013.

4.5.1 ENSAYOS REALIZADOS AL MATERIAL DE BASE GRANULAR

Se ensayos realizados se presentan en el ANEXO F.:

4.5.2 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE EVALUACIÓN DEL MATERIAL DE BASE MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO

En el siguiente cuadro se presentan la síntesis de los ensayos de laboratorio realizados al material de base granular de la vía en estudio.

Tabla 45: RESUMEN DE ENSAYOS CALICATA – 1.

CALICATA	ENSAYO REALIZADO	IRI (m/km)		
		NORMA		
C-1 Km. 07+500	Contenido de humedad.	ASTMD 2216 -	4.8%	
	Análisis granulométrico.	ASTM D421	AASHTO ¹⁰ A-1-a	
			SUCS ¹¹ GW - GM	
	Limite líquido.	ASTM D 4318	N.P.	
	Limite plástico.			
	Proctor modificado.	NTP 339.141 ASTM D 1557	M.D.S.	2.087 gg/cm3
			Hum. óptima	8.07%
CBR.	ASTM D 1883	100%M.D.S.	70%	
		95%M.D.S.	33%	

¹⁰ American Association of State Highway and Transportation Officials – Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transportes.

¹¹ Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Tabla 46: RESUMEN DE ENSAYOS CALICATA – 2

CALICATA	ENSAYO REALIZADO	IRI (m/km)			
		NORMA			
C-1 Km. 07+500	Contenido de humedad.	ASTMD 2216 -	4.4%		
	Análisis granulométrico.	ASTM D421	AASHTO	A-1-a	
			SUCS	SM	
	Limite líquido.	ASTM D 4318	N.P.		
	Limite plástico.				
	Proctor modificado.	NTP 339.141 ASTM D 1557	M.D.S.	2.055 gg/cm3	
			Hum. óptima	8.56 %	
CBR.	ASTM D 1883	100%M.D.S.	62%		
		95%M.D.S.	49%		

De acuerdo al “Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG 2013” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones; en la sección 403 “Bases granulares” donde nos muestra la tabla de requerimientos granulométricos para base granular:

Tabla 47: REQUERIMIENTOS GRANULOMÉTRICOS PARA BASE GRANULAR.

Tamiz	Porcentaje que pasa en peso			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm. (2")	100	100		
25mm. (1")		75 – 95	100	100
9.5mm. (3/8")	30 – 65	40 – 75	50 – 85	60 – 100
4.75mm. (N°4)	25 – 55	30 – 60	35 – 65	50 – 85
2.0mm. (N°10)	15 – 40	20 – 45	25 – 50	40 – 70
425µm. (N°40)	8 – 20	15 – 30	15 – 30	25 – 45
75 µm. (N°200)	2 – 8	5 – 15	5 – 15	8 – 15

NOTA: Para las zonas con altitud iguales o mayores a 3,000.00 msnm. se deberá seleccionar la gradación A.

Fuente: Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG 2013.

Las curvas granulométricas para la presente evaluación vienen a ser las siguientes:

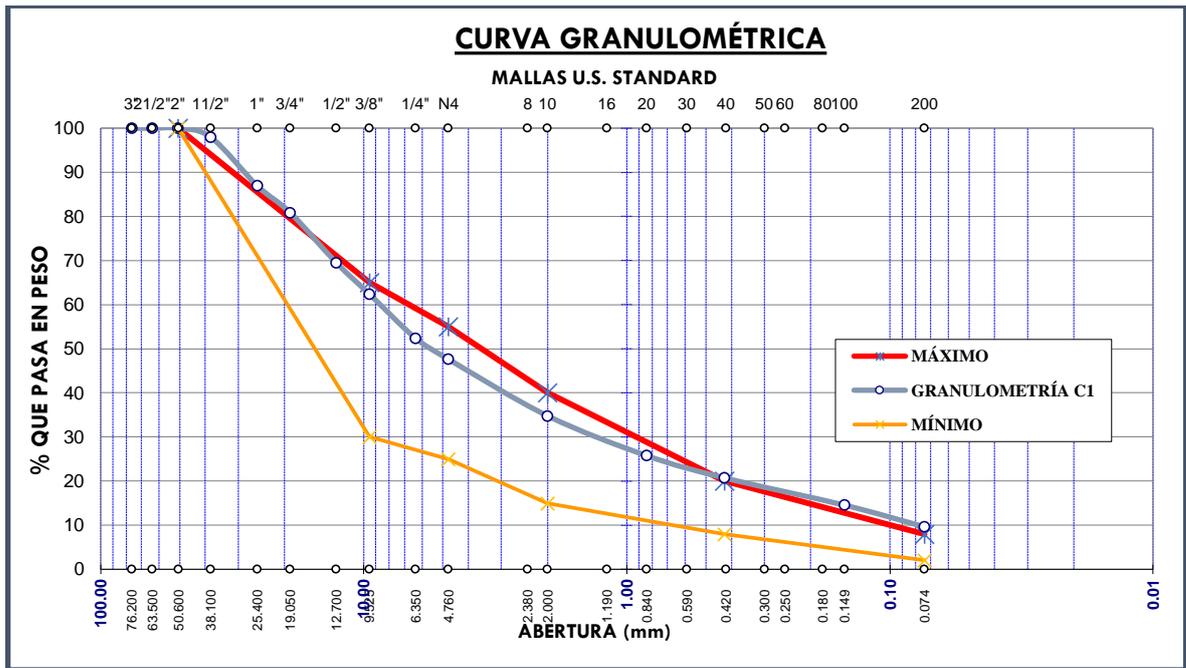


Gráfico 35: CURVA GRANULOMÉTRICA C1: KM 07+500.

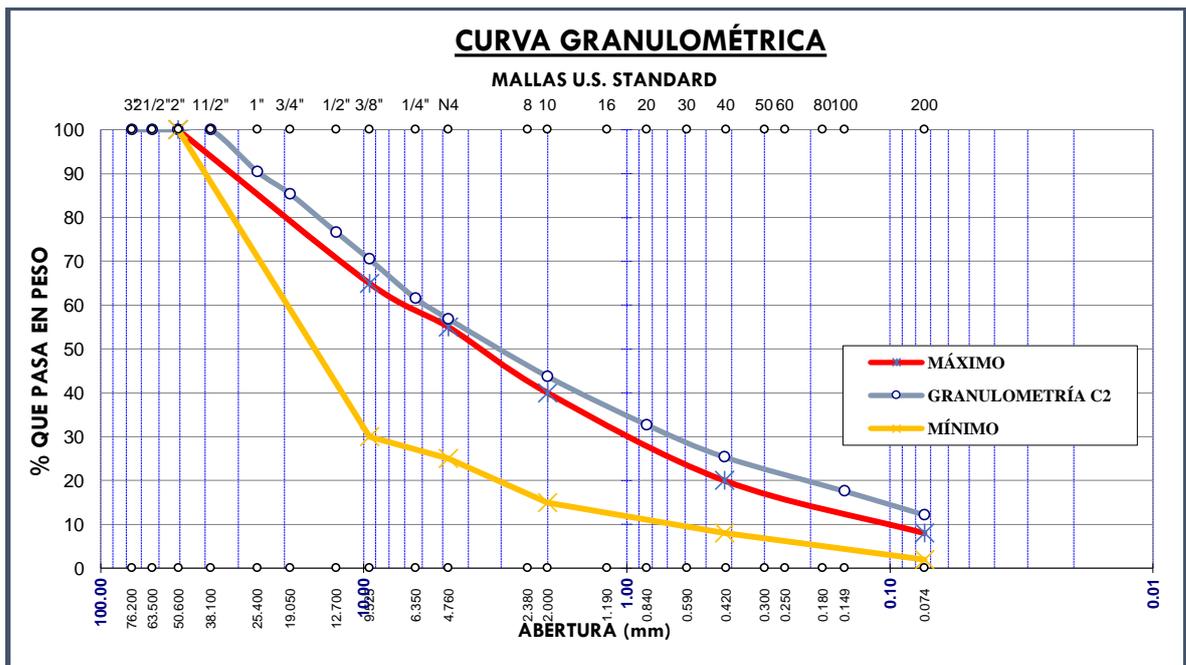


Gráfico 36: CURVA GRANULOMÉTRICA C2: KM 16+400.

El material de base granular deberá cumplir además con las siguientes características físico-mecánicas que se indican en la siguiente tabla:

Tabla 48: REQUERIMIENTOS DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE CBR.

Valor Relativo de Soporte – CBR(*)	Trafico en ejes equivalentes (<math><10^6</math>)	Min. 80 %
	Trafico en ejes equivalentes (>math>\geq 10^6</math>)	Min 100%

(*) Referido al 100% de la Máxima Densidad Seca y una penetración de 0.1”(2.54mm)

Fuente: Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG 2013.

Tabla 49: REQUERIMIENTOS AGREGADO FINO.

Ensayo	NORMA	Requerimientos Altitud	
		< 3,000.00 msnm.	≥ 3,000.00 msnm.
Índice plástico.	MTC E 111	4% máx.	2 % mín.

Fuente: Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG 2013.

En consecuencia la curva granulométrica referido a los dos primeros kilómetros críticos (C1, km 07+500) se encuentra fuera del rango establecido en el Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción de Carreteras EG-2013, por lo que se trataría de un material inadecuado para la utilización como base granular.

La curva granulométrica referido a los dos últimos kilómetros críticos (C2, km 16+400) también se encuentra fuera del rango establecido en el Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción de Carreteras EG-2013, por lo que se trataría de un material inadecuado para la utilización como base granular.

El resultado de CBR de la calicata 1 (km 07+500) al 100% de la máxima densidad seca es de 70%, mientras que el resultado de CBR de la calicata 2 (km 16+400) al 100% de la máxima densidad seca es de 62%. Con lo cual queda en evidenciado que en ambas muestras el valor de CBR es menor al mínimo admisible (80%), con lo cual se puede afirmar que el material de base granular no cumple con las normas establecidas en el Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción de Carreteras EG-2013.

4.6 CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

A continuación se verifica el cumplimiento del objetivo general y los cuatro (04) objetivos específicos planteados para la presente investigación:

Objetivo General

Evaluar el estado del pavimento, mediante deflectometría y rugosidad, en la carretera Puno – Vilque – Mañazo, en los 4 Km más críticos.

Hipótesis General

La evaluación del estado del pavimento de la vía Puno – Vilque – Mañazo, presenta un deficiente desempeño del pavimento.

Sí se cumplió el objetivo general de evaluar el pavimento mediante la deflectometría y rugosidad en la vía Puno – Vilque – Mañazo, en los 4km más críticos, utilizando para ello la viga Benkelman y el rugosímetro Merlin (ver anexos D y E), mediante lo cual se verificó que la hipótesis general es cierta ya que los resultados comparados con la normatividad vigente del MTC indican un deficiente desempeño del pavimento.

Objetivos Específico 1.- *Evaluar el estado actual de la vía Puno – Vilque – Mañazo, por el método del Índice de condición del pavimento – 2015.*

Hipótesis Específica 1.- *El estado del pavimento de la vía Puno – Vilque – Mañazo, según el método del índice de condición del pavimento es “malo”.*

Sí se cumplió el objetivo planteado, ya que se evaluó la vía por el método del índice de condición del pavimento – PCI (ver anexo B), mediante el cual se pudo validar que la primera hipótesis específica planteada es cierta, ya que la condición del pavimento en promedio presenta una valoración de “Malo”.

Objetivos Específico 2.- *Evaluar el estado actual de las deflexiones del pavimento de la vía Puno-Vilque-Mañazo en los 4km más críticos del tramo.*

Hipótesis Específica 2.- *La evaluación del estado actual de las deflexiones del pavimento de la vía Puno – Vilque – Mañazo en los 4 Km más críticos, resultan ser menores a las deflexiones admisibles.*

Sí se cumplió el objetivo planteado, ya que se evaluó la vía utilizando la Viga Benkelman para obtener las deflexiones en los cuatro (04) km más críticos (ver pág. 116), mediante el cual se pudo evidenciar que la segunda hipótesis específica

planteada no es cierta, ya que las deflexiones en el pavimento resultan ser menores a la deflexión admisible.

Objetivos Específico 3.- *Evaluar con las unidades Merlin el Índice de regularidad internacional de la vía Puno – Vilque – Mañazo, en los 4Km más críticos del tramo.*

Hipótesis Específica 3.- *La evaluación con unidades Merlin del Índice de Regularidad Internacional del pavimento de la vía Puno – Vilque – Mañazo, en los 4Km más críticos, indica una rugosidad mayor a 2.5 m/km, concordante con la normatividad del MTC.*

Sí se cumplió el objetivo planteado, ya que se evaluó los cuatro (04) km más críticos utilizando para ello el Rugosímetro Merlin (ver pág. 139), mediante el cual se pudo validar que la tercera hipótesis específica planteada es cierta, ya que el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) promedio expresado en unidades merlin resulta ser mayor a 2.5m/km.

Objetivos Específico 4.- *Evaluar con métodos destructivos la vía Puno – Vilque – Mañazo, en dos puntos críticos del tramo objeto de la investigación.*

Hipótesis Específica 4.- *La evaluación con métodos destructivos en la vía Puno – Vilque – Mañazo, resultan en un deficiente estado del material que compone la estructura del pavimento, concordante con la normatividad del MTC.*

Sí se cumplió el objetivo planteado, ya que se evaluó mediante el método destructivo los cuatro (04) km más críticos (ver anexo F), realizando dos (02) calicatas las cuales se encuentran dentro de los tramos más críticos, con lo cual se pudo validar que la cuarta hipótesis específica planteada es cierta, ya que resultó que el material que compone la estructura del pavimento es deficiente, comparado con lo estipulado en las Especificaciones Técnicas Generales de Carreteras EG - 2013.

CONCLUSIONES

- La evaluación mediante el método del Índice de Condición de Pavimento permitió identificar los dos tramos que comprenden los 4 kilómetros más críticos de la carretera Puno – Vilque – Mañazo, es decir, los tramos: km 06+500 al km 08+500 y km 16+400 al km 18+400.
- Mediante el ensayo con la Viga Benkelman en el pavimento se obtuvo los valores de deflexión característica promedio de: 69.22×10^{-2} mm y radio de curvatura de 199.37m en el carril derecho (ver tabla 40, pág. 116); 65.53×10^{-2} mm y radio de curvatura de 197.39m en el carril izquierdo (ver tabla 41, pág. 117), lo que nos indica que las deflexiones características no superan la deflexión admisible la cual es de 127.5×10^{-2} mm, lo que conlleva a entender que el pavimento está en buenas condiciones en lo que se refiere a los controles deflectométricos.
- Luego de realizada la evaluación del pavimento con el Rugosímetro Merlin, se observó un desgaste considerable quedando evidenciado éste con el valor del IRI, teniendo unos valores IRI de: 4.79 m/km en el carril derecho y 4.63 m/km en el carril izquierdo (ver tabla 44, pág. 139); con los cuales se puede concluir que el pavimento evaluado no cumple con las especificaciones técnicas y los requerimientos que estipula el Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”, donde nos indica que la regularidad característica no deberá ser mayor a 4.00, para carreteras de un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles, obteniéndose valores promedio a 4.71.

RECOMENDACIONES

- Para obtener una mayor precisión en los resultados de la evaluación por el Método del Índice de Condición de Pavimento, se recomienda evaluar todas las unidades de muestra.
- Es necesario utilizar equipo de seguridad en el proceso de recolección de datos en campo como son: chaleco, casco, mascarilla, cinta de seguridad, conos de seguridad, entre otros, ya que la inspección visual es un trabajo peligroso por el tránsito y polvo.
- La evaluación de pavimentos como la vía estudiada, se deberán efectuar de preferencia entre los meses de abril a noviembre para evitar la presencia de precipitaciones pluviales, ya que éstas podrían interrumpir la recolección de datos y/o muestras y posiblemente pueden incidir en los resultados.
- Se recomienda realizar la evaluación estructural de una forma “completa”, es decir, los 39.9 Km y utilizar todos los métodos y ensayos con que se cuenta en la actualidad para evaluar pavimentos ya que nos dará una mejor visión sobre las deficiencias que se pudieran presentar y así poder optar por la mejor alternativa de solución.

BIBLIOGRAFÍA

- Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). *Manual de Evaluación de Pavimentos*. (UNI, Ed.) Lima - Perú.
- Crespo del Río, R. (1997). *Introducción a la Auscultación de Firmes* (5ta ed.). (AEPO , S.A. Ingenieros Consultores, Ed.) Madrid - España.
- D. Gillespie, T., & O. Paterson , W. (1986). *Guía para la Conducción y Calibración de Medidas de Rugosidad de Carreteras*. Washington D.C. Recuperado el 12 de Diciembre de 2016, de <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/3133/72764.pdf>
- Del Aguila Rodriguez, P. (1999). *Metodología para la determinación de la Rugosidad de los Pavimentos*. Lima - Peru.
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles – (2013). *Manual de Carreteras - Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013*. Perú: MTC.
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles – (2013). *Manual de Carreteras – Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección Suelos y Pavimentos*. Perú: MTC.
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles – (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Perú: MTC.
- M. del Aguila, P. (1999). *Desarrollo de la Ecuación de Correlación para la Determinación del IRI en Pavimentos Asfálticos Nuevos Utilizando el Rugosímetro Merlin*. Perú. Recuperado el 11 de Noviembre de 2016, de <https://es.scribd.com/doc/71491331/Ecuacion-IRI-Rugosimetro-MERlin>
- Madruga Ferreira, C. (2007). *Trabalhando com Viga Benkelman*. Brasil. Recuperado el 01 de Noviembre de 2016, de <http%3A%2F%2Fxa.yimg.com%2Fkq%2Fgroups%2F13240622%2F808742709%2Fname%2FDeflectometria%2B2007.pdf>
- Menéndez Acurio, J. R. (2009). *Ingeniería de Pavimentos; Materiales, Diseño y Conservación*. (1ra ed.). Lima: Perú.
- Montejo Fonseca, A. (2006). *Ingeniería de Pavimentos*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones.
- PUC - CHILE. (1995). *Diagnóstico de Serviciabilidad de Pavimentos*. Santiago: CHILE. Recuperado el 01 de Diciembre de 2016, de https://www.google.com.pe/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.minvu.cl%2Fincjs%2Fdownload.aspx%3Fglb_cod_nodo%3D20070317102718%26hdd_nom_archivo%3DRese%25C3%25B1a%252098-14.pdf&ei=cMxQUriALYbc9QT064HADg&usg=AFQjCNEQ1_wV42VcU3lpUdiX6V FHSgxisA&sig2=I-f0Llf6FmNGXYLWkTMJig&bvm=bv.53537100,d.eWU&cad=rja

- S. Hoffman, M., & M. del Aguila, P. (1985). *Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones*. Recuperado el 11 de noviembre de 2016, de <http://www.camineros.com/docs/cam039.pdf>
- Sayers, M., & Karamihas, S. (1998). *Basic Information About Measuring and Interpreting Road Profiles*. Michigan: The regent of the university of michigan. Recuperado el 23 de Noviembre de 2016, de <http://www.umtri.umich.edu/content/LittleBook98R.pdf>
- Solminihac, H. (2006). *Gestión de Infraestructura Vial* (3ra ed.). (Universidad Católica de Chile, Ed.) Santiago - Chile.
- Ventura J., A. (2005). *Determinación del Índice de Regularidad Internacional IRI*. (T. V. Unidad de Investigación y Desarrollo Vial. Ministerio de Obras Publicas, Ed.) El Salvador.
- Vivar R., G. (1998). *Comentarios sobre la Medición e Interpretación de la Rugosidad en los Pavimentos del Perú*. Lima-Perú.
- Vivar Romero, G. (1995). *Diseño y Construcción de Pavimentos* (2da. ed.). Lima: Colegio de Ingenieros del Perú.

ANEXOS

- ANEXO A** : CURVAS DE VALORES DEDUCIDOS.
- ANEXO B** : FORMATOS DE PROCESAMIENTO Y RECOLECCIÓN DE DATOS DEL MÉTODO DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO (PCI).
- ANEXO C** : ESTUDIO DE TRÁFICO DE LA VÍA PUNO – VILQUE – MAÑAZO.
- ANEXO D** : FORMATOS DE PROCESAMIENTO Y RECOLECCIÓN DE DATOS DE LOS ENSAYOS CON LA VIGA BENKELMAN.
- ANEXO E** : FORMATOS DE PROCESAMIENTO Y RECOLECCIÓN DE DATOS DE LOS ENSAYOS CON EL RUGOSÍMETRO MERLIN.
- ANEXO F** : ESTUDIOS DE MECÁNICA DE SUELOS (CONTENIDO DE HUMEDAD - GRANULOMETRÍA – LÍMITE LÍQUIDO – LÍMITE PLÁSTICO – PROCTOR MODIFICADO – CBR).
- ANEXO G** : PANEL FOTOGRÁFICO.