



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



UAC

TESIS

Análisis comparativo entre las estimaciones del porcentaje de vida remanente útil obtenidas a partir de una evaluación funcional y una evaluación estructural, del pavimento flexible en el tramo T'icapata – Pumamarca en la carretera ENACO – Abra Ccorao

Presentado por:

Bach. Benito Cárdenas, Vladimir

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Asesor:

Ing. Merino Yépez, Robert Milton

CUSCO – PERÚ

2020



Dedicatoria:

Dedico este trabajo a mis padres: Domingo y Robertina, a mis hermanos: Mijhail y Rosa; a mis abuelos Rosa y Amadeo, Benancio y Donata; por el apoyo moral y la paciencia en la culminación de mi carrera profesional.



Agradecimiento:

A la Universidad Andina del Cusco por permitirme formarme como profesional en sus aulas.

A mi asesor Ing. Milton Merino Yépez, por sus consejos, recomendaciones y aportes en la culminación de la presente tesis.

A todas las personas que directa e indirectamente contribuyeron en cada etapa de mi formación como profesional de ingeniería.

Benito Cárdenas, Vladimir



Resumen

En la presente tesis se investigó la relación entre las estimaciones de vida remanente útil, a partir de una evaluación funcional con mira y nivel topográficos y una evaluación estructural con la Viga Benkelman, en el pavimento flexible en el tramo T'icapata – Cc. Pumamarca en la carretera ENACO – Abra Ccorao del distrito de San Sebastián.

En la evaluación funcional del pavimento con mira y nivel, se obtuvo el perfil longitudinal ubicado a 1.10 metros del borde del pavimento, tanto en el carril descendente y ascendente. Los perfiles longitudinales obtenidos son de calidad aceptable para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional – IRI, en el tramo de estudio haciendo uso del software ProVAL 3.61.30, con el cual, calculamos un índice de 4.007 m/Km en el carril ascendente y un índice de 5.184 m/Km en el carril descendente. Estimando un índice IRI promedio de 4.596 m/Km de ambos carriles. Seguidamente, por medio de expresiones y correlaciones se calculó el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI) de 2.17, con la finalidad de cualificar el nivel de transitabilidad del tramo del pavimento. Finalmente, con éste índice de serviciabilidad se obtuvo mediante la Metodología de Distribución Weibull la vida remanente útil de 32.9 % del pavimento flexible del tramo en estudio.

En la evaluación estructural del pavimento haciendo uso de la Viga Benkelman, se midió las deflexiones de pavimento en intervalos de 200 metros en cada carril; ello, se realizó de manera intercalada para obtener un intervalo de muestreo en el tramo de 100 metros. Posteriormente, en gabinete se realizó el análisis deflectométrico en base a la metodología utilizada por el Consorcio de Rehabilitación de Carreteras MTC – CONREVIAl. Obteniendo los parámetros de: El Radio de Curvatura, con un valor promedio de 95.5 metros; La Deflexión Característica, con un valor de 3.66 milímetros; La Deflexión Admisible, con un valor de 1.144 milímetros calculado a partir de proyecciones para el año 2019 de datos bibliográficos del Índice Medio Diario Anual (IMDA) del Expediente Técnico de la carretera en el año 2008. La metodología clasifica a la estructura del pavimento, como fatigada o que cumplió con los Ejes Equivalentes de Carga para el cual fue diseñado.

Se concluyó, que la diferencia de los porcentajes de Vida Remanente Útil entre las estimaciones es mayor al 10% planteadas inicialmente como hipótesis general.

Palabras clave: Evaluación funcional – Evaluación estructural – Vida remanente útil



Abstract

In this thesis, the relationship between the estimates of the remaining useful life was investigated, based on a functional evaluation with topographic sight and level and a structural evaluation with the Benkelman Beam, on the flexible pavement in the T'icapata - Cc Pumamarca on the ENACO - Abra Ccorao road in the San Sebastián district.

In the functional evaluation of the pavement with sight and level, the longitudinal profile located 1.10 meters from the edge of the pavement was obtained, both in the descending and ascending lane. The longitudinal profiles obtained are of acceptable quality for the calculation of the International Roughness Index - IRI, in the study section using the ProVAL 3.61.30 software, with which, we calculate an index of 4,007 m / km in the ascending lane and an index of 5,184 m / km in the descending lane. Estimating an average IRI index of 4,596 m / Km of both lanes. Then, through expressions and correlations, the Present Serviceability Index (PSI) of 2.17 was calculated, with the purpose of qualifying the level of passability of the pavement section. Finally, with this serviceability index, the remaining useful life of 32.9% of the flexible pavement of the section under study was obtained through the Weibull Distribution Methodology. It is concluded that the difference in the percentages of remaining useful life between the estimates is greater than 10% raised as the initial general hypothesis. In the structural evaluation of the pavement using the Benkelman Beam, pavement deflections were measured at intervals of 200 meters in each lane; this was done in an interleaved way to obtain a sampling interval in the 100-meter section. Subsequently, in the cabinet the deflectometric analysis was carried out based on the methodology used by the MTC - CONREVIAR Road Rehabilitation Consortium. Obtaining the parameters of: The Radius of Curvature, with an average value of 95.5 meters; The Characteristic Deflection, with a value of 3.66 mm; Admissible Deflection, with a value of 1.144 millimeters calculated from projections for the year 2019 of bibliographic data from the Annual Average Daily Index (IMDA) of the Technical File of the road in 2008. The methodology classifies the pavement structure, as fatigued or who complied with the Equivalent Load Shafts for which it was designed.

It was concluded that the difference in the percentages of Useful Remaining Life between the estimates is greater than 10% initially proposed as a general hypothesis.

Keywords: Functional evaluation – Structural evaluation – Remaining useful life



Introducción

Es notable el uso de métodos y relaciones empíricas en el diseño en pequeñas, medianas y grandes estructuras construidas en el ámbito de la ingeniería civil, los cuales, generalmente se fundamentan en modelos físico-matemáticos que tratan de emular factores externos de la realidad, valiéndose en conceptos, definiciones, suposiciones y simplificaciones de variables que están involucradas del complejísimo hecho real. Estos modelos se toman como fundamento científico, por entidades encargadas en emitir normas y reglamentos en el sector construcción, para su uso común en el pre-diseño y diseño por profesionales calificados en la gran mayoría de construcciones a nivel nacional.

La especialidad de ingeniería de transporte no es ajena a lo comentado en el anterior párrafo, si nos enfocamos en la área de pavimentos, el cual involucra el diseño, construcción, mantenimiento rutinario periódico, rehabilitación o reconstrucción de infraestructuras viales, cuyas guías y directrices están establecidos en normas, ensayos y reglamentos proporcionados por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones – MTC, generalmente basados en normas de entidades internacionales como: AASHTO, ASTM y otros.

En las vías urbanas se opta por cualquier tipo de pavimentos, los mayormente utilizados son: pavimentos rígidos o flexibles, según sea la importancia de la vía; en contraparte, las vías vecinales, departamentales y nacionales generalmente se utiliza el pavimento flexible por su ventaja económica. Son pocas las vías a nivel nacional que, presentando un volumen considerable de tránsito de vehículos, son concesionados a entidades privadas los cuales se encargan del mantenimiento y correcta operatividad de tales vías; por el contrario, las vías interdepartamentales que presentan bajo volumen vehicular son de competencia por gobiernos municipales y regionales que no cuentan con una adecuada gestión vial.

La presente investigación se situó en el área de evaluación de pavimentos, que actualmente no forma parte, de un plan de gestión vial en gobiernos locales y regionales, en donde se evalúe y registre la evolución histórica de las vías y se asigne un presupuesto para la conservación o rehabilitación en los tiempos adecuados, pues, resulta más costoso reconstruir o esperar que el pavimento llegue al final de su vida útil antes de cumplir el periodo de diseño, para recién aplicar una medida correctiva.



Existen una diversidad considerable de métodos de evaluación de pavimentos, del tipo destructivo y no destructivo, el primero se basa en evaluar el pavimento a través de ensayos en laboratorio normados a los componentes de la estructura del pavimento constituidos en núcleos obtenidos directamente de la estructura, por medio de perforaciones en el pavimento con diamantina; el segundo, denominado así por ser un método de evaluación de pavimentos en donde se obtiene información del pavimento con procedimientos indirectos que no dañan la estructura de pavimento.

Dentro de los métodos de evaluación no destructivos del pavimento flexible, primero se optó por una evaluación del tipo funcional, en la carpeta de rodadura, donde se obtuvo un Índice de Serviciabilidad Presente (PSI) a través del cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI); segundo, se realizó una evaluación no destructiva del tipo estructural, para obtener parámetros de respuesta de la estructura conformada por el pavimento y la sub rasante.

La investigación realizó un análisis comparativo entre los datos obtenidos por los dos métodos de evaluación del tipo no destructiva. El tramo de prueba en donde se realizó las evaluaciones fue el tramo T'icapata – Cc. Pumamarca de la carretera ENACO – Abra San Martín del distrito de San Sebastián - Cusco – Cusco, el cual es una de las vías importantes para el acceso a los distritos del valle sagrado de los incas cuyas actividades principales son la agricultura y el turismo.

En la presente investigación consta de los siguientes capítulos:

Capítulo I: Se identifica el problema, justifica, limita y se plantea los objetivos que persigue la presente investigación.

Capítulo II: Describe los antecedentes históricos, bases teóricas, formulación de la hipótesis y definición de variables de la tesis.

Capítulo III: Expone la metodología, el diseño de ingeniería, población y muestra, instrumentos y procedimientos de recolección de datos que se desarrolló en la investigación.

Capítulo IV: Hace referencia a los más relevante encontrado del análisis de datos.

Capítulo V: Consta de la interpretación de los resultados obtenidos y se realiza un comentario de la corroboración de las hipótesis.



Índice General

DEDICATORIA:.....	I
AGRADECIMIENTO:.....	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
INTRODUCCIÓN.....	V
1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1.1. Descripción del problema	1
1.1.2. Formulación interrogativa del problema.....	4
1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.2.1. Justificación técnica	4
1.2.2. Justificación social	5
1.2.3. Justificación por vialidad	6
1.2.4. Justificación por relevancia	7
1.3. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.3.1. Limitaciones geográficas	7
1.3.2. Limitaciones internas	9
1.3.3. Limitaciones externas	10
1.4. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.4.1. Objetivo general.....	11
1.4.2. Objetivos específicos	11
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	12
2.1. ANTECEDENTES DE LA TESIS O INVESTIGACIÓN ACTUAL	12
2.1.1. Antecedentes a nivel local	12
2.1.2. Antecedentes a nivel nacional	14
2.1.3. Antecedentes a nivel internacional	17
2.2. ASPECTOS TEÓRICOS PERTINENTES	19
2.2.1. Definición de pavimento.....	19
2.2.2. California Bearing Ratio (CBR)	21
2.2.3. Factores principales externos que influyen en el pavimento.....	22



2.2.4.	Tipos de fallas en los pavimentos asfálticos	23
2.2.5.	Características de tipo funcional de un pavimento.....	25
2.2.6.	Evaluación funcional de un pavimento por medio del Índice de rugosidad Internacional (IRI)	28
2.2.7.	Índice Medio Diario Anual (IMDA).....	39
2.2.8.	Posicionamiento Geodésico Estático y Dinámico	43
2.2.9.	Evaluación funcional utilizando de Método de Nivel Estático de un pavimento	46
2.2.11.	Índice de Serviciabilidad Presente (PSI).....	60
2.2.12.	Notas sobre el intervalo empleado en el perfil	66
2.2.13.	Estimación del porcentaje de vida remanente útil de un pavimento a partir de un modelo de distribución Weibull	66
2.2.14.	Evaluación estructural de un pavimento	72
2.2.15.	Evaluación estructural de un pavimento con la Viga Benkelman.....	77
2.2.16.	Estimación del porcentaje de vida remanente útil a partir de una evaluación estructural con la Viga Benkelman.....	92
2.2.17.	Procedimientos cuantitativos para realizar un mantenimiento o rehabilitación de vías	96
2.2.	HIPÓTESIS.....	99
2.3.1.	Hipótesis general	99
2.3.2.	Sub hipótesis	99
2.4.	DEFINICIÓN DE VARIABLES	100
2.4.1.	Variables independientes.....	100
2.4.2.	Variables dependientes	100
2.4.3.	Cuadro de operacionalización de variables	101
3.	CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	102
3.3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	102
3.3.1.	Enfoque de la investigación	102
3.3.2.	Nivel o alcance de la investigación	102
3.3.3.	Método de investigación	103
3.4.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	103
3.4.1.	Diseño metodológico	103
3.4.2.	Diseño de ingeniería	105



3.5.	POBLACIÓN Y MUESTRA	106
3.5.1.	Población	106
3.5.2.	Muestra	107
3.5.3.	Criterios de inclusión.....	109
3.6.	INSTRUMENTOS	109
3.6.1.	Instrumentos metodológicos o instrumentos de recolección de datos	109
3.6.2.	Instrumentos de ingeniería	122
3.7.	PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	129
3.7.1.	Conteo Vehicular	129
3.7.2.	Establecimiento de Puntos de Control Geodésico con GPS Diferencial 134	
3.7.3.	Levantamiento topográfico de la carretera.....	145
3.7.4.	Replanteo de coordenadas referenciales en el tramo de estudio	157
3.7.5.	Análisis funcional del pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – CC Pumamarca, de la carretera ENACO – Abra Ccorao.....	167
3.7.6.	Análisis estructural del pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – CC Pumamarca, de la carretera ENACO – Abra Ccorao.....	186
3.8.	PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS DE DATOS.....	206
3.8.1.	Cálculo del Índice Medio Diario Anual (IMDA) y los Ejes Equivalentes 206	
3.8.2.	Estimación del porcentaje de vida remanente útil a partir una evaluación funcional con nivel topográfico en el pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – CC de Pumamarca, de carretera ENACO – Abra Ccorao	211
3.8.3.	Estimación del porcentaje de vida remanente útil a partir una evaluación estructural con la Viga Benkelman en el pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – CC de Pumamarca, de carretera ENACO – Abra Ccorao	247
4.	CAPÍTULO IV: RESULTADOS	258
4.1.	ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL – IMDA.....	258
4.2.	ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE VIDA ÚTIL REMANENTE A PARTIR DE UNA EVALUACIÓN FUNCIONAL	264
4.3.	ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE VIDA ÚTIL REMANENTE A PARTIR DE UNA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL	270



4.4. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS PORCENTAJES DE VIDA REMANENTE ÚTIL A PARTIR DE LA EVALUACIÓN FUNCIONAL Y LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL	272
5. CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	275
GLOSARIO.....	280
CONCLUSIONES.....	285
RECOMENDACIONES	289
REFERENCIAS	292
ANEXOS	298
ANEXO N°1: AFORO VEHICULAR	298
ANEXO N°2: TICKET DE PESAJE DEL CAMIÓN TIPO C-2 EN BALANZAS DEL SUR S.A.....	326
ANEXO N°3: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL NIVEL AUTOMÁTICO NA728 POR EMEI PERÚ	327
ANEXO N°4: DOCUMENTOS DE COORDINACIÓN DE LA POLICÍA NACIONAL DEL PERÚ Y LOS PRESIDENTES COMUNALES DEL SECTOR T'ICAPATA Y COMUNIDAD DE PUMAMARCA. ...	329
ANEXO N°5: PANEL FOTOGRÁFICO	332
ANEXO N°6: PLANOS	339
ANEXO N°7: DISCO COMPACTO.....	340



Índice de tablas

TABLA 1. DATOS A NIVEL DE INGENIERÍA DE LA CARRETERA ENACO – ABRA CCORAO	3
TABLA 2.- COORDENADAS UTM DEL PUNTO DE PARTIDA	9
TABLA 3.- COORDENADAS UTM DEL PUNTO FINAL	9
TABLA 4. ACCIÓN DEL PAVIMENTO A NIVEL DE SUB-RASANTE.....	22
TABLA 5. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DE REGULARIDAD SUPERFICIAL DE UN PAVIMENTO	31
TABLA 6. CUADRO COMPARATIVO ENTRE VALORES ALTOS Y BAJOS DE IRI.....	36
TABLA 7. VALORES DE IRI ADMISIBLES SEGÚN TIPO DE CARRETERA.....	38
TABLA 8. CLASE Y TIPO DE VEHÍCULOS.....	40
TABLA 9. FACTOR DE CORRECCIÓN DE VEHÍCULOS LIGEROS POR UNIDAD DE PEAJE PROMEDIO (2010-2016).....	40
TABLA 10. FACTOR DE CORRECCIÓN DE VEHÍCULOS PESADOS POR UNIDAD DE PEAJE PROMEDIO (2010-2016).....	41
TABLA 11. MEDICIÓN EN MÉTODOS TOPOGRÁFICOS PARA APLICACIONES EN TRABAJOS DE DIVERSAS MAGNITUDES DE IMPORTANCIA.....	45
TABLA 12. CLASIFICACIÓN DE LA MEDICIÓN EN FUNCIÓN PRECISIONES O RESOLUCIONES DE LOS EQUIPOS.....	48
TABLA 13. ESCALA DE CALIFICACIÓN DE LA SERVICIABILIDAD.....	61
TABLA 14. SERVICIABILIDAD INICIAL, PO.....	63
TABLA 15. SERVICIABILIDAD FINAL, PT	63
TABLA 16. CALIFICACIÓN DE LA SERVICIABILIDAD O TRANSITABILIDAD	64
TABLA 17. RANGOS Y VALORES CARÁCTERÍSTICOS DE IRI EN FUNCIÓN DEL PSI	65
TABLA 18. PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN WEIBULL.....	71
TABLA 19. PARÁMETROS DEL MODELO DE HOOG.....	74
TABLA 20. DISTANCIAS DEL PUNTO DE ENSAYO DEL BORDE EN FUNCIÓN DEL ANCHO DE CARRIL.....	82
TABLA 21. COEFICIENTES DE CORRECCIÓN POR ESTACIONALIDAD A LAS DEFLEXIONES CARACTERÍSTICAS	85
TABLA 22. DEFINICIÓN DE DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA SEGÚN TIPO DE CARRETERA	88
TABLA 23. JUICIO DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO	91
TABLA 24. TIPOS DE TASAS CRECIMIENTO	93



TABLA 25. RELACIÓN DE CARGAS POR EJE PARA DETERMINAR EJES EQUIVALENTE (EE), PARA AFIRMADOS, PAVIMENTOS FLEXIBLES Y SEMIRRÍGIDOS.	94
TABLA 26. REPARACIONES Y PROCEDIMIENTOS PREVENTIVOS PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES (AASTHO 93).....	96
2.4.3. TABLA 27. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN	101
TABLA 28. CUANTIFICACIÓN DE LA POBLACIÓN PARA LA EVALUACIÓN FUNCIONAL	108
TABLA 29. CUANTIFICACIÓN DE LA POBLACIÓN PARA LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL	108
TABLA 30. FORMATO DE CONTEO VEHICULAR	110
TABLA 31. FORMATO DE CÁLCULO DEL ÍNDICE MEDIO DIARIO SEMANAL - IMDS	111
TABLA 32. FORMATO DE TOMA DE COORDENADAS UTM DE LOS PUNTOS DE CONTROL GEODÉSICOS CON EQUIPO GPS DIFERENCIAL TRIMBLE R8S.....	112
TABLA 33. FORMATO DE TOMA DE COORDENADAS UTM DE LOS PUNTOS OBTENIDOS CON LA ESTACIÓN TOTAL LEICA TS06 PLUS.....	113
TABLA 34. FORMATO DE TOMA DE DATOS DE LA EVALUACIÓN FUNCIONAL CON MIRA Y NIVEL EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO EN ESTUDIO	114
TABLA 35. FORMATO DE COMPENSACIÓN DE COTAS EN LA NIVELACIÓN CERRADA CON MIRA Y NIVEL EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO EN ESTUDIO	115
TABLA 36. FORMATO DE CONVERSIÓN DE COTAS TOPOGRÁFICAS AL FORMATO ERD	116
TABLA 37. FORMATO DE RECOLECCIÓN DE DEFLEXIONES EN LOS PUNTOS DE PRUEBA SOBRE EL PAVIMENTO FLEXIBLE EN EL TRAMO EN ESTUDIO	117
TABLA 38. FORMATO DE CORRECCIÓN DE DEFLEXIONES POR LA RELACIÓN DE BRAZO DE LA VIGA BENKELMAN	118
TABLA 39. FORMATO DE CORRECCIÓN DE DEFLEXIONES POR TEMPERATURA DEL PAVIMENTO	119
TABLA 40. FORMATO PARA EL CÁLCULO DEL RADIO DE CURVATURA.....	120
TABLA 41. FORMATO PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO – DEFLEXIÓN MEDIA Y DESVIACIÓN ESTANDAR	121
TABLA 42. INSTRUMENTOS DE INGENIERÍA EN EL ESTABLECIMIENTO DE 03 PUNTOS DE CONTROL EN EL TRAMO SECTOR DE T'ICAPATA – CC PUMAMARCA	122
TABLA 43. INSTRUMENTOS DE INGENIERÍA EN EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DEL TRAMO SECTOR T'ICAPATA – CC PUMAMARCA DE LA CARRETERA ENACO – ABRA CCORAO	123



TABLA 44. INSTRUMENTOS DE INGENIERÍA EN LA EVALUACIÓN FUNCIONAL – CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL – EN EL TRAMO DEL SECTOR T'ICAPATA – CC PUMAMARCA DE LA CARRETERA ENACO – ABRA Ccorao.	125
TABLA 45. INSTRUMENTOS DE INGENIERÍA EN LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL – VIGA BENKELMAN - EN EL TRAMO DEL SECTOR T'ICAPATA – CC PUMAMARCA DE LA CARRETERA ENACO – ABRA Ccorao.	127
TABLA 46. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES PARA EL CONTEO VEHICULAR EN EL TRAMO DE ESTUDIO	130
TABLA 47. RESULTADOS DESEADOS PARA CADA ENSAYO POSTERIOR	135
TABLA 48. ESPECIFICACIONES EQUIPO GPS TRIMBLE R8s	136
TABLA 49. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS PUNTOS DE CONTROL	137
TABLA 50. CARACTERÍSTICAS GENERALES PARA LA MONUMENTACIÓN DE PUNTOS GEODÉSICOS.....	138
TABLA 51. COORDENADAS UTM DE LOS PUNTOS DE CONTROL GEODÉSICO TOMADOS CON EL EQUIPO GPS DIFERENCIAL TRIMBLE R8s.	144
TABLA 52. ELEMENTOS A CONSIDERAR EN EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CON LA ESTACIÓN TOTAL LEICA TS06 PLUS	146
TABLA 53. COORDENADAS UTILIZADAS EN LA ORIENTACIÓN DE LA ESTACIÓN TOTAL LEICA TS06 PLUS.....	147
TABLA 54. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA ESTACIÓN TOTAL LEICA TS06 PLUS... ..	148
TABLA 55. RECOLECCIÓN DE DATOS DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DEL TRAMO DE LA CARRETERA	151
TABLA 56. COORDENADAS ESTE Y NORTE PARA REPLANTEO EN LA EVALUACIÓN FUNCIONAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO SECTOR T'ICAPATA – CC PUMAMARCA, DE LA CARRETERA ENACO – ABRA Ccorao	159
TABLA 57. COORDENADAS ESTE Y NORTE PARA REPLANTEO EN LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO SECTOR T'ICAPATA – CC PUMAMARCA, DE LA CARRETERA ENACO – ABRA Ccorao	161
TABLA 58. DATOS RECOLECTADOS DEL REPLANTEO PARA LA EVALUACIÓN FUNCIONAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO EN ESTUDIO DE LA CARRETERA.....	163
TABLA 59. DATOS RECOLECTADOS DEL REPLANTEO PARA LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO EN ESTUDIO DE LA CARRETERA.....	164



TABLA 60. DATOS OBTENIDOS DE LA NIVELACIÓN CERRADA CON MIRA Y NIVEL TOPOGRÁFICO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE, DE LOS 100 M EN EL CARRIL DE IZQUIERDO DE DESCENDENTE DEL TRAMO EN ESTUDIO.	179
TABLA 61. TRAMOS HOMOGÉNEOS EN FUNCIÓN DE SU PENDIENTE PROMEDIO	194
TABLA 62. PERSONAL UTILIZADO PARA LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO ...	196
TABLA 63. DATOS RECOLECTADOS DE LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO EN ESTUDIO	205
TABLA 64. RESUMEN SEMANAL DEL CONTEO VEHICULAR EN LA ESTACIÓN 1	206
TABLA 65. RESUMEN SEMANAL DEL CONTEO VEHICULAR EN LA ESTACIÓN 2	207
TABLA 66. FACTORES DE CORRECCIÓN ESTACIONAL (MES DE JUNIO).....	208
TABLA 67. CORRECCIÓN POR EL FACTOR ESTACIONAL EN LA ESTACIÓN 1	208
TABLA 68. CORRECCIÓN POR EL FACTOR ESTACIONAL EN LA ESTACIÓN 2	209
TABLA 69. PROMEDIO DE ÍNDICE MEDIO DIARIO SEMANAL EN LAS ESTACIONES.....	210
TABLA 70. ERRORES A COMPENSAR POR TRAMO DE NIVELACIÓN.....	212
TABLA 71. DATOS COMPENSADOS DE LA NIVELACIÓN CERRADA EN EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO EN ESTUDIO	212
TABLA 72. COTAS COMPENSADAS EN LA NIVELACIÓN, LLEVADAS A FORMATO ERD	218
TABLA 73. CÁLCULO DEL IRI POR UNIDAD DE MUESTRA DE 15 M EN EL CARRIL IZQUIERDO DE DESCENDENTE.....	221
TABLA 74. CALIFICACIÓN SEGÚN LA TRANSITABILIDAD DEL CARRIL IZQUIERDO	228
TABLA 75. CÁLCULO DEL IRI POR UNIDAD DE MUESTRA DE 15 M EN EL CARRIL DERECHO DE ASCENDENTE.....	234
TABLA 76. CLASIFICACIÓN SEGÚN LA TRANSITABILIDAD DEL CARRIL DERECHO.....	240
TABLA 77. VALORES PROMEDIO DEL CARRIL DE ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL –IRI Y ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD PRESENTE – PSI DEL TRAMO EN ESTUDIO	245
TABLA 78. CÁLCULO DE LAS DEFLEXIONES EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE A PARTIR DE LAS LECTURAS EN EL DIAL DEFORMÍMETRO	247
TABLA 79. CÁLCULO DE LAS DEFLEXIONES REALES O CORREGIDAS POR LA RELACIÓN DE BRAZO DE LA VIGA BENKELMAN	248
TABLA 80. DEFLEXIONES RECOLECTADAS EN CAMPO CORREGIDAS A LA TEMPERATURA DE 20 °C	249
TABLA 81. DEFLEXIONES CORREGIDAS POR ESTACIONALIDAD	250
TABLA 82. CÁLCULO DE LA DEFLEXIÓN MEDIA (DM) Y LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (DS)	252
TABLA 83. RADIO DE CURVATURA EN METROS PARA EL ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO.	253



TABLA 84. CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DEL TRÁNSITO EN EL AÑO 2008	254
TABLA 85. FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA POR TIPO DE VEHÍCULO	255
TABLA 86. CÁLCULO DEL EAL DE DISEÑO PARA HALLAR LA DEFLEXIÓN ADMISIBLE EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO EN ESTUDIO	256
TABLA 87. COMPOSICIÓN PORCENTUAL DEL TRÁNSITO DE ACUERDO A TIPO DE VEHÍCULO	259
TABLA 88. DISTRIBUCIÓN POR SENTIDO DE LOS VEHÍCULOS EN PORCENTAJE.....	259
TABLA 89. COMPOSICIÓN PORCENTUAL DEL TRÁNSITO DE ACUERDO A TIPO DE VEHÍCULO	261
TABLA 90. DISTRIBUCIÓN POR SENTIDO DE LOS VEHÍCULOS EN PORCENTAJE.....	261
TABLA 91. RESUMEN DE LOS VALORES DE BASE POR TIPO DE VEHÍCULO	262
TABLA 92. VALORES DEL ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL – IMDA DEL EXPEDIENTE TÉCNICO Y ACTUALES	263
TABLA 93. CANTIDAD DE UNIDADES DE MUESTRA POR TIPO DE VALOR PSI	264
TABLA 94. VARIACIÓN DE IRI (M/KM) SEGÚN LA LONGITUD DE EVALUACIÓN	265
TABLA 95. CANTIDAD DE UNIDADES DE MUESTRA POR TIPO DE VALOR PSI	267
TABLA 96. VARIACIÓN DE IRI (M/KM) SEGÚN LA LONGITUD DE EVALUACIÓN	268
TABLA 97. TIPO DE EVALUACIÓN, EQUIPOS Y METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	273



Índice de figuras

FIGURA 1. DEPARTAMENTO DEL CUSCO FUENTE: WIKIPEDIA	8
FIGURA 2. PROVINCIA DEL CUSCO. FUENTE: GOOGLE MAPS	8
FIGURA 3. TRAMO SECTOR T'ICAPATA – C.C. PUMAMARCA. FUENTE: GOOGLE EARTH 20198	
FIGURA 4. PERFILES LONGITUDINALES QUE SE PRESENTAN EN UNA VÍA. FUENTE: PRADENA MIGUEL (2006)	29
FIGURA 5. ESCALA ESTÁNDAR EMLEADA POR EL BANCO MUNDIAL PARA LA CUANTIFICACIÓN DEL IRI. FUENTE: WORLD BANK (RECUPERADO EN BADILLA,2008)	30
FIGURA 6. MIRA Y NIVEL TOPOGRÁFICO. FUENTE: WWW.ALBIREOTOPOGRAFÍA.ES	32
FIGURA 7. PERFILÓGRAFO DE CALIFORNIA. FUENTE: WWW.WIKIPEDIA.ORG	32
FIGURA 8. EQUIPO DIPSTICK. FUENTE: VENTURA J. (RECUPERADO DE B. VARGAS (2009) 32	
FIGURA 9. RUGOSÍMETRO DE MERLIN. FUENTE: L. HIRPAHUANCA (TESIS DE PREGRADO, 2016).....	33
FIGURA 10. PERFILÓMETROS INERCIALES LASER. FUENTE: WWW.EQUIPOSIRI.COM.....	33
FIGURA 11. BUMP INTEGRATOR. FUENTE: WWW.VELCITI.COM	33
FIGURA 12. MODELO DE MASA RESORTES DEL CUARTO DE COCHE. FUENTE: DE SOLMINIHAC, H (RECUPERADO DE BADILLA VARGAS, 2008)	34
FIGURA 13. CURVAS DE PARA PAVIMENTOS CON IRI INICIAL DISTINTOS. FUENTE: BADILLA VARGAS (2009)	35
FIGURA 14. MEDICIONES DE RUGOSIDAD CON PERFILÓMETRO LASER DYNATEST MARK REALIZADAS EN UNA RED VIAL NACIONAL ASFALTADA. FUENTE: RECUPERADO DE M. GOICOCHEA (TESIS DE MAESTRÍA ,2013).....	37
FIGURA 15. MEDICIONES DE RUGOSIDAD CON EL PERFILÓMETRO INERCIAL ROUGHMETER II REALIZADAS EN LA CONCESIÓN RED VIAL N° 5. FUENTE: RECUPERADO DE M. GOICOCHEA (TESIS DE MAESTRÍA, 2013).....	37
FIGURA 16. LAS TRES SUPERFICIES DE LA TIERRA. FUENTE INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL – IGN (2015).....	44
FIGURA 17. EJEMPLO DE PROGRAMA BASIC. FUENTE: STANDARD TEST METHOD FOR MEASURING ROAD ROUGHNESS BY STATIC LEVEL METHOD, E 1364 – 95(2005).....	53
FIGURA 18. SOFTWARE PROVAL 3.61.30. FUENTE: U.S. DEPARTAMENT OF TRANSPORTATION	54
FIGURA 19. VISUALIZACIÓN DEL ARCHIVO ERD HACIENDO USO DE PROGRAMA BLOCK DE NOTAS. FUENTE: MONTOYA GOICOCHEA (TESIS DE MAESTRÍA,2013).....	56



FIGURA 20. NIVELACIÓN SIMPLE DESDE EL EXTREMO. FUENTE: CASANOVA MATERA (2002, PÁG. 181).....	57
FIGURA 21. NIVELACIÓN SIMPLE DESDE EL MEDIO. FUENTE: CASANOVA MATERA (2002, PÁG. 181).....	57
FIGURA 22. NIVELACIÓN GEOMÉTRICA COMPUESTA DESDE EL MEDIO. FUENTE: CASANOVA MATERA (2002, PÁG. 181).....	58
FIGURA 23. MÉTODO PROPORCIONAL Y PUNTOS DE CAMBIO. FUENTE: CASANOVA MATERA (2002).....	60
FIGURA 24. ESQUEMA DEL DETERIORO DEL PAVIMENTO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO. FUENTE: SOLMINIHAC T. (OBTENIDO DE MARTINEZ ALARCÓN, TESIS DE PREGRADO, 2015).....	67
FIGURA 25. FUNCIÓN DE DENSIDAD DE LA DISTRIBUCIÓN WEIBULL. FUENTE: WWW.WIKIPEDIA.ORG.....	69
FIGURA 26. ANÁLISIS DE CAPAS ELÁSTICA. FUENTE: BURMISTER (RECUPERADO DE BALAREZO, 1017).....	72
FIGURA 27. ESQUEMA DEL MODELO DE HOOG. FUENTE: S. HOFFMAN Y M. DEL ÁGUILA (1985).....	73
FIGURA 28. DEFLECTOMETRÍA CON LA VIGA BENKELMAN. FUENTE: WWW.MECANICISTA.COM.....	75
FIGURA 29. DEFLECTÓGRAFO LACROIX-03 DE CHASIS LARGO. FUENTE: WWW.GEOCISA.COM.....	76
FIGURA 30. FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER. FUENTE: WWW.THETRANSTECGROUP.COM.....	76
FIGURA 31. ESQUEMA Y OPERACIÓN DE VIGA BENKELMAN. FUENTE: HOFFMAN Y DEL ÁGUILA (1985).....	78
FIGURA 32. ESQUEMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN CON LA VIGA BENKELMAN. FUENTE: HOFFMAN Y DEL ÁGUILA (1985).....	79
FIGURA 33. MEDICIONES DE DEFLEXIONES A 0 CM, 25 CM, 50 CM, 100 CM Y EN EL INFINITO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019.....	84
FIGURA 34. RADIO DE CURVATURA EN LA DEFLEXIÓN DEL PAVIMENTO. FUENTE: REYES LIZCANO (OBTENIDO DE CUBAS DE LA TORRE, TESIS DE PREGRADO, 2017).....	86
FIGURA 35. PESOS Y MEDIDAS PARA LOS VEHÍCULOS C2, C3 Y C4. FUENTE: REGLAMENTO NACIONAL VEHÍCULOS (2003) - MTC.....	93
FIGURA 36. DETERMINACIÓN DEL PERIODO DE VIDA ÚTIL REMANENTE. FUENTE: DÍAZ RUIZ (INFORME DE SUFICIENCIA, 2010).....	95



FIGURA 37. CATÁLOGO DE REFUERZOS DE PAVIMENTO FLEXIBLE. FUENTE: MANUAL DE CARRETERAS, SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS (2013) EN BASE A LA METODOLOGÍA CONREVIAl	98
FIGURA 38. TIPOLOGÍA DE LOS MÉTODOS Y DISEÑOS DE INVESTIGACIÓN. FUENTE: HERNÁNDEZ SAMPIERI, FERNANDEZ COLLADO Y BAPTISTA LUCIO (2014).....	104
FIGURA 39. DISEÑO DE INGENIERÍA DE LA INVESTIGACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	105
FIGURA 40. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES. FUENTE: COPESCO – PLANO BASE DEL CUSCO.....	130
FIGURA 41. CONTEO VEHICULAR EL DÍA LUNES 27 DE MAYO DEL 2019, PREVIO AL ESTUDIO DE TRÁFICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	131
FIGURA 42. CAMIÓN TIPO 3E CIRCULANDO EN EL TRAMO SECTOR T'IKAPARA - CC PUMAMARCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019.....	132
FIGURA 43. CAMIÓN 3S3 CIRCULANDO EN EL TRAMO SECTOR T'IKAPARA - CC PUMAMARCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019.....	132
FIGURA 44. FORMATO DE CONTEO VEHICULAR EL DÍA LUNES 03 DE JUNIO DEL 2019, DE LA ESTACIÓN 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019.....	133
FIGURA 45. CONTEO VEHICULAR ESTACIÓN 1 – E1, PARADERO T'ICAPATA CALLE ARMAVCALLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	133
FIGURA 46. CONTEO VEHICULAR ESTACIÓN 2 – E1, JUNTO A LA SEÑAL INFORMATIVA DE LA CC PUMAMARCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019.....	134
FIGURA 47. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS 03 PUNTOS DE CONTROL GEODÉSICO. FUENTE: GOOGLE EARTH PRO 2019	137
FIGURA 48. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS GENERALES DE LOS PUNTOS DE CONTROL GEODÉSICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	138
FIGURA 49. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	138
FIGURA 50. AMADO DE LA BASE DEL GPS EN LA UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019.....	139
FIGURA 51. ARMADO DE LA RADIO UHF EN LA UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019.....	140
FIGURA 52. SALIDA CON EL ROVER Y LA COLECTORA DE DATOS PARA LA TOMA DE PUNTOS DE CONTROL GEODÉSICO EL DÍA 20/08/2019. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	141



FIGURA 53. TOMA DE DATOS GNSS ESTÁTICO DEL PUNTO DE CONTROL GEODÉSICO P.C.1 SECTOR DE T'ICAPATA EN LA PROGRESIVA 1+833 KM DE LA CARRETERA ENACO – ABRA CCORAO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	142
FIGURA 54. TOMA DE DATOS GNSS ESTÁTICO DEL PUNTO DE CONTROL GEODÉSICO P.C.2 SECTOR DE T'ICAPATA EN LA PROGRESIVA 1+943 KM DE LA CARRETERA ENACO – ABRA CCORAO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	143
FIGURA 55. TOMA DE DATOS GNSS ESTÁTICO DEL PUNTO DE CONTROL GEODÉSICO P.C.2 LA CC PUMAMARCA EN LA PROGRESIVA 3+834 KM DE LA CARRETERA ENACO – ABRA CCORAO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	143
FIGURA 56. POSICIONAMIENTO DEL ROVER EN LA VARILLA EN EL MONUMENTADO DEL PUNTO DE CONTROL GEODÉSICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	143
FIGURA 57. ESTACIONAMIENTO DE LA ESTACIÓN TOTAL EN P.C. 1 PARA ORIENTACIÓN POR COORDENADAS DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DEL TRAMO DE LA CARRETERA EN ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	147
FIGURA 58. COLOCANDO EN POSICIÓN HORIZONTAL CON EL NIVEL & PROMADA DE LA ESTACIÓN TOTAL LEICA TS06 PLUS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	149
FIGURA 59. DISPARÓ CON LÁSER DE LA ESTACIÓN TOTAL AL PRISMA UBICADO EN BUZONES, ALCANTARILLAS Y OTROS DETALLES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	150
FIGURA 60. DISPARO CON LÁSER DE LA ESTACIÓN TOTAL AL PRISMA UBICADO EN EL EJE, BORDES Y CUNETAS DE LA VÍA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	150
FIGURA 61. DISPARÓ CON LÁSER DE LA ESTACIÓN TOTAL AL PRISMA UBICADO EN ESQUINAS, VEREDAS, POSTES Y PREDIOS DE VIVIENDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019...	150
FIGURA 62. CAMBIO DE PROGRESIVAS ORIGINALES DE LA CARRETERA ENACO – ABRA CCORAO POR PROGRESIVAS RELATIVAS EN LA EVALUACIÓN FUNCIONAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO EN ESTUDIO. FUENTE: GOOGLE EARTH PRO	158
FIGURA 63. CAMBIO DE PROGRESIVAS ORIGINALES DE LA CARRETERA ENACO – ABRA CCORAO POR PROGRESIVAS RELATIVAS EN LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO EN ESTUDIO. FUENTE: GOOGLE EARTH PRO.....	160
FIGURA 64. CARGADO DE LAS COORDENADAS OBTENIDAS EN EL CIVIL 3D 2018 A LA BASE DE DATOS DE LA ESTACIÓN TOTAL LEICA TS06 PLUS, PARA LOS REPLANTEOS EN EL GABINETE DE TOPOGRAFÍA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	162
FIGURA 65. PROGRESIVA RELATIVA 0+000 KM EQUIVALENTE A LA PROGRESIVA 3+834 KM, DEL CARRIL DE DESCENDENTE, PARA LA EVALUACIÓN FUNCIONAL EN EL SECTOR DE LA CC DE PUMAMARCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	165



FIGURA 66. PROGRESIVA RELATIVA 0+000 KM EQUIVALENTE A LA PROGRESIVA 1+683 KM, EN EL CARRIL DE ASCENDENTE, PARA LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL EN EL SECTOR DE T'ICAPATA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 165

FIGURA 67. REPLANTEO CADA 100 M DESDE CC PUMAMARCA HASTA SECTOR T'ICAPATA EN EL CARRIL DE DESCENDENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019..... 165

FIGURA 68. REPLANTEO CON LA ESTACIÓN TOTAL LEICA TS06 PLUS, CON LA FUNCIÓN PARA REPLANTEAR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019. 165

FIGURA 69. MARCADO CON TIZA DEL PUNTO DE REPLANTEO EN LA MITAD DEL CARRIL Y CON PINTURA EN EL BORDE DEL PAVIMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019. 166

FIGURA 70. REPLANTEO CADA 100 M DESDE SECTOR DE T'ICAPATA HASTA LA CC DE PUMAMARCA EN EL CARRIL DE ASCENDENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 166

FIGURA 71. UBICACIÓN DEL PUNTO DE INICIO A 0.70 M DEL CENTRO DEL CARRIL DE DESCENDENTE EN LA CARRETERA ENACO – ABRA CCORAO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 168

FIGURA 72. UBICACIÓN DEL CENTRO EN EL CARRIL DE DESCENDENTE DE LONGITUD DE 3.60 M. EN LA PROGRESIVA ORIGINAL DE 3+834 KM DE LA CARRETERA ENACO – ABRA CCORAO, EN LA CC DE PUMAMARCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 168

FIGURA 73. UBICACIÓN DE LA LÍNEA LONGITUDINAL A 1.10 M DEL BORDE DEL PAVIMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 169

FIGURA 74. ESTACIONAMIENTO GENERAL EN LA BERMA DEL PAVIMENTO, DEL NIVEL TOPOGRÁFICO EN LA EVALUACIÓN DE UNA UNIDAD DE MUESTRA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 172

FIGURA 75. INICIO DE LA NIVELACIÓN CERRADA EN EL P.C.3 DE LA CC. DE PUMAMARCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 173

FIGURA 76. SE UBICÓ Y MARCÓ CON PINTURA CATERPILLAR LOS BM'S DE NIVELACIÓN, APROXIMADAMENTE A 1 BM CADA 500 METROS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 173

FIGURA 77. MARCADO CON TIZA A UN INTERVALO DE 0.5 M EN LA UNIDAD DE MUESTREO DE 15 M. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 174

FIGURA 78. EXTENDIDO Y FIJADO DE LA CINTA MÉTRICA DE 30, SOBRE LA LÍNEA DE HUELLA EXTERNA DEL NEUMÁTICO, A 1.10 M DEL BORDE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 174

FIGURA 79. TOMA DE LAS VISTAS INTERMEDIAS A 0.5 M DE LA LÍNEA DE HUELLA EXTERNA DEL NEUMÁTICO, CON EL LADO MILIMETRODO DE LA MIRA. LA DISTANCIA ENTRE LA MIRA Y EL



NIVEL TOPOGÁFICO NO DEBE DE EXCEDER DE 40 METROS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019. 175

FIGURA 80. BURBUJA NIVELANTE ACOPLADA A LA MIRA, PARA EVITAR EL ERROR INTRODUCIDO EN LA DESVIACIÓN DE LA MIRA DE LA VERDADERA LÍNEA VERTICAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019. 176

FIGURA 81. NIVELACIÓN EN LA PROGRESIVA RELATIVA 2+000 KM, EN EL SECTOR T'ICAPATA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019. 177

FIGURA 82. APLICATIVO DE LIBRETA TOPOGRÁFICA PARA TRABAJOS DE NIVELACIÓN EN CAMPO. FUENTE: GOOGLE PLAY STORE. 177

FIGURA 83. LIBRETA DE CAMPO DIGITAL, ESPECIALMENTE PARA TOMA DE DATOS DE UNA NIVELACIÓN. FUENTE: GOOGLE PLAY STORE 178

FIGURA 84. FACILIDAD DE EXPORTACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN FORMATO CSV. FUENTE: GOOGLE PLAY STORE 178

FIGURA 85. CAMIÓN DE PRUEBA PARA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE, PLACA X1N – 834, CON UN CUBICAJE DE 6 M3. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 187

FIGURA 86. ESPACIAMIENTO DE 32 CM, ENTE LOS EJES DE LAS RUEDAS DUALES EN EL EJE POSTERIOR. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA 2019 187

FIGURA 87. LLANTAS DUALES DE 1000 X 20 O 10"X20" EN EL EJE POSTERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019..... 187

FIGURA 88. PIEDRA CHANCADA DE 1/2", CON PESO UNITARIO SUELTO APROXIMADO DE 1450 – 1500 KG/M3. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019. 188

FIGURA 89. PESADO DEL CAMIÓN A DOS TERCERAS PARTES DESDE EL EJE POSTERIOR CON LA TOLVA VACÍA, EN LA BALANZA ELECTRÓNICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 189

FIGURA 90. PRUEBA APROXIMATIVA IN SITU DE LA VENTA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, DEL PESO UNITARIO SUELTO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 1/2 ". FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 190

FIGURA 91. CARGADO DEL CAMIÓN EN LA TOLVA POSTERIOR DEL CAMIÓN CON PIEDRA CHANCADA DE 1/2". FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 190

FIGURA 92. EXTENDIDO DE LA PIEDRA CHANCADA EN LA TOLVA, A UNA ALTURA APROXIMADAMENTE UNIFORME. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 191



FIGURA 93. PESADO A DOS TERCERAS PARTES DESDE EL EJE POSTERIOR DEL CAMIÓN, CON UN PESO BRUTO EN EL EJE POSTERIOR DE 8.2 TONELADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	191
FIGURA 94. TONELAJE DEL EJE POSTERIOR REQUERIDO, EN LA BALANZA ELECTRÓNICA DE BALANZAS DEL SUR, CON 10 KG DE UNIDAD MÍNIMA. FUENTE: BALANZAS DEL SUR	192
FIGURA 95. INFLADO DE LLANTAS DUALES, TANTO INTERNA COMO EXTERNA; PREVIO A LA ETAPA DE CAMPO, A UNA PRESIÓN DE 80 PSI. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	193
FIGURA 96. SOLDADO DE UNA CADENA EN LA PARTE POSTERIOR QUE SERVIRÁ DE PLOMADA EN EL ENSAYO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	193
FIGURA 97. MEDICIÓN DE EJE DE LLANTAS HASTA EL EXTREMO DE LA CADENA EN EL PAVIMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	194
FIGURA 98. VEHÍCULO DE TRANSPORTE DEL EQUIPO DE TRABAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	195
FIGURA 99. MARCADO CON CINTA MASKING EN EL BRAZO DE LA VIGA A 25 CM, 50 CM, 1 M Y 2 M. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	196
FIGURA 100. SEÑALES INFORMATIVAS A 100 M DESPUÉS DE LA EVALUACIÓN DEL PUNTO DE ENSAYO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	197
FIGURA 101. SEÑALES INFORMATIVAS A 100 M ANTES DE LA EVALUACIÓN DEL PUNTO DEL ENSAYO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	197
FIGURA 102. VERIFICACIÓN DE LA PRESIÓN DE INFLADO CADA HORA, CUYO VALOR DEBE ESTAR ENTRE 75-85 PSI. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	198
FIGURA 103. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO CON EL TERMÓMETRO DIGITAL DE CONTACTO DIRECTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	198
FIGURA 104. TOMA DE DATOS EN LA HUELLA INTERNA DEL CAMIÓN POR MOTIVOS DE SEGURIDAD O LIMPIEZA EN EL PUNTO DE ENSAYO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	199
FIGURA 105. UBICACIÓN DEL PUNTO DE ENSAYO A 0.75 M DEL BORDE DEL PAVIMENTO, EN LA PROGRESIVA RELATIVA 0+500 KM. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	199
FIGURA 106. UBICACIÓN DEL CAMIÓN EN EL PUNTO DE ENSAYO DE LA PROGRESIVA RELATIVA 2+000 KM DEL CARRIL DE DESCENDENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	200
FIGURA 107. UBICACIÓN DEL CAMIÓN EN EL PUNTO DE ENSAYO DE LA PROGRESIVA RELATIVA 1+100 KM DEL CARRIL DE ASCENDENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	200



FIGURA 108. LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS A ENSAYAR SOBRE LA LÍNEA TRANSVERSAL AL EJE DE LA VÍA, EN LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO SECTOR T'ICAPATA – CC DE PUMAMARCA, DE LA CARRETERA ENACO – ABRA CCORAO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 201

FIGURA 109. VIGA BENKELMAN DEL LABORATORIO DE SUELOS Y ASFALTOS DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 202

FIGURA 110. MARCAS ADICIONALES DONDE SE TOMARON LAS DEFLEXIONES EN EL PAVIMENTO. EN LA FIGURA EL PUNTO DE ENSAYO SE TOMÓ EN LA HUELLA INTERIOR POR PRESENCIA DE FALLAS LONGITUDINALES UBICADAS EN LA HUELLA EXTERIOR DEL CAMIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019..... 204

FIGURA 111. ARCHIVO ERD PARA HALLAR EL IRI VISUALIZADO EN ARCHIVO DE TEXTO. FUENTE: ELABORACIÓN EN FUNCIÓN DE MONTOYA GOICOCHEA (TESIS DE MAESTRÍA, 2013)..... 219

FIGURA 112. PERFIL TOPOGRÁFICO DEL CARRIL DE IZQUIERDO DESCENDENTE Y DERECHO DE ASCENDENTE, CON UN INTERVALO DE 0.50 M, EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO DEL SECTOR T'ICAPATA – CC PUMAMARCA, DE LA CARRETERA ENACO-ABRA CCORAO. FUENTE: PROVAL 3.61.30..... 220

FIGURA 113. REPORTE DEL PROGRAMA PROVAL DE LOS VALORES DE IRI, TANTO PARA EL CARRIL IZQUIERDO DESCENDENTE COMO PARA EL CARRIL DERECHO ASCENDENTE. FUENTE: PROVAL 3.61.30 221

FIGURA 114. VARIACIÓN GRÁFICA DEL IRI EN EL CARRIL IZQUIERDO DE BAJADA, POR UNIDAD DE MUESTRA DE 15 M. FUENTE: PROVAL 3.61.30 227

FIGURA 115. VARIACIÓN GRÁFICA DEL IRI EN EL CARRIL DERECHO DE SUBIDA, POR UNIDAD DE MUESTRA DE 15 M. FUENTE: PROVAL 3.61.30 239

FIGURA 116. GRAFICO DEFLEXIÓN ADMISIBLE CON DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019 EN BASE A LA METODOLOGÍA CONREVIAL - MTC 257

FIGURA 117. DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN HORARIO EN LA ESTACIÓN 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019..... 258

FIGURA 118. DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN HORARIO EN LA ESTACIÓN 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019..... 260

FIGURA 119. COMPOSICIÓN DEL TRAFICO EN PORCENTAJE DEL TRAMO EN ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019..... 263

FIGURA 120. CUALIFICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTRA EN FUNCIÓN DE LA ESCALA DE TRANSITABILIDAD, DEL CARRIL IZQUIERDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019.... 264



FIGURA 121. VALORES DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL – IRI CADA 100 METROS. FUENTE: SOFTWARE PROVAL 3.61.30.....	266
FIGURA 122. CUALIFICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTRA EN FUNCIÓN DE LA ESCALA DE TRANSITABILIDAD, DEL CARRIL DERECHO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	267
FIGURA 123. VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL – IRI POR CADA 100 EN EL TRAMO DE ESTUDIO. FUENTE: SOFTWARE PROVAL 3.61.30.....	269
FIGURA 124. ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y DEFLECTOGRAMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019	270
FIGURA 125. VARIACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA EN EL TRAMO EN ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 2019.....	271



1. Capítulo I: Planteamiento del problema

1.1. Identificación del problema

1.1.1. Descripción del problema

El aumento del nivel económico y social que acompaña las dos últimas décadas a la región del Cusco, debe de ir a la par con una adecuada red vial que se encuentre en óptimas condiciones, de modo que garantice un adecuado tránsito de los usuarios en dichas infraestructuras.

Entre las causas principales del deterioro de los pavimentos en nuestra región son:

- La inexistencia de un sistema de drenaje y evacuación de aguas pluviales; o el colapso de ellas por falta de limpieza y mantenimiento de las cunetas y alcantarillas adyacentes al pavimento, de modo que, la estructura pavimento-subrasante se halle saturado por varias horas.
- El acelerado incremento del parque automotor en los últimos años en la Región del Cusco, el cual, hace que los periodos de vida remanente útil de los pavimentos se reduzcan debido al incremento de cargas de fatiga del pavimento.
- Deficiencias en los procedimientos constructivos, principalmente en el extendido y compactación de los materiales constituyentes de cada capa del pavimento.
- El incumplimiento de los cronogramas presupuestales de mantenimiento rutinario anual establecidos en los expedientes técnicos, por parte de entidades estatales competentes. Los cuales forman parte de la post-ejecución de los proyectos de ingeniería vial, principalmente debido a procedimientos burocráticos.
- La inexistencia o precaria implementación de un plan de gestión vial principalmente en las carreteras bajo responsabilidad de las Municipalidades Distritales y Gobiernos Regionales, en donde se registre de manera directa y actualizada el estado real de los pavimentos, con procedimientos de evaluación que ya son de uso común en muchos países del mundo.



Las causas anteriormente mencionadas hacen que en las vías aparezcan fallas del tipo funcional o estructural como baches, depresiones, ahuellamientos, fisuras, pérdidas de los agregados que los conforman, y otros. Lo cual hace que exista una pérdida del confort de los usuarios de las vías.

Balarezo, J. (Tesis de Pregrado, 2017), expone que generalmente los pavimentos en el nuestro país son evaluados visualmente y la decisión de mantenimiento es simplemente a nivel superficial, el cual, generalmente resulta insuficiente debido a que el tipo de falla o deterioro no sólo se enmarca a nivel funcional. Sino que puede ser una falla de tipo estructural producto del deterioro de la capacidad portante de la estructura pavimento-subrasante.

Realizar evaluaciones tanto a nivel funcional (en la superficie) y a nivel estructural resulta ser lo más recomendado, con la finalidad de realizar un registro histórico de las vías evaluadas actualizándolas cada cierto tiempo, en donde se aprecien las evoluciones de periodos de vida útil. Las entidades competentes valiéndose de tales registros, planteen destinar un monto determinado para el mantenimiento en los tramos en donde las vías son clasificadas como malas, de acuerdo al tipo de evaluación que se haya efectuado.

La investigación presente trató de realizar un análisis comparativo, entre las estimaciones de vida remanente útil a partir una evaluación funcional utilizando el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y una evaluación estructural con la Viga Benkelman. De modo que, se pueda obtener un indicador que permita tomar la decisión de intervenir la vía con fines mantenimiento o rehabilitación.

La ejecución de los ensayos de campo propios de las normas que se tienen a nivel nacional e internacional, en lo referente a evaluación de pavimentos; se realizaron en el pavimento flexible del tramo sector T'icapata – Cc. Pumamarca de la carretera ENACO – Abra Ccorao, cuenta con 2151.04 metros lineales.

De Gómez y Quispe (Tesis de Pregrado, 2017), se extrajo los siguientes datos pertenecientes a la carretera motivo de evaluación:



La carretera pertenece a la carretera N° CU-1133 (Según la Actualización del Clasificador de Rutas del Sistema Nacional de Carreteras del decreto supremo N° 011-2016-MTC). La carretera cuenta con el Expediente Técnico de nombre: “Santutis Chico, Cc. Pumamarca, abra San Martin Puerto, del distrito de San Sebastián”, donde el perfil del proyecto fue realizado el año 2008 e inaugurado el año 2011 por el Gobierno Regional del Cusco. A continuación, se muestra algunos datos a nivel de ingeniería:

Tabla 1. Datos a nivel de ingeniería de la Carretera ENACO – Abra Ccorao

CARACTERÍSTICAS	PARÁMETROS
Espesor de la carpeta asfáltica:	2”
Clasificación orográfica	Terreno Ondulado
Pendientes transversales al eje de vía	11 – 50 %
Pendientes Longitudinales	3 – 6 %
IMDA	575 vehículos/día
Longitud total	9505 m
Ancho de Plataforma	6 m
Derecho de vía	12 m
Bombeo	2%
Tipo de cunetas:	Triangulares de 0.60x0.40
Velocidad directriz máxima	30 km/h
Alcantarillas:	Diámetros 24”, 36”, 48”, 60”
Muros de sostenimiento:	Concreto $f'c = 140 \text{ Kg/cm}^2 + 70\%$ Piedra grande. De tamaño promedio de 1.42 ml x h=2 m
Señalización:	<ul style="list-style-type: none">- Vertical con señales reguladoras, señales informativas, postes de kilometraje y guardavías.- Horizontal con demarcación en el pavimento al centro y en los laterales.

Fuente: Gómez y Quispe (2017) - Banco de Proyectos MEF



1.1.2. Formulación interrogativa del problema

a) Formulación interrogativa del problema general

¿Qué contraste existe entre los porcentajes de vida remanente útil obtenidos a partir de una evaluación funcional (Equipos Topográficos) y una evaluación estructural (Viga Benkelman), del pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – C.C. Pumamarca, en la carretera ENACO- Abra Ccorao?

b) Formulación interrogativa de los problemas específicos

- **Problema específico N° 1:** ¿Cuál es el nivel de serviciabilidad del pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – C.C. Pumamarca, en la carretera ENACO-Abra Ccorao?
- **Problema específico N° 2:** ¿Cuál es el porcentaje de vida remanente útil, a partir de la evaluación funcional con los equipos topográficos de Mira y Nivel, del pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – C.C. Pumamarca, en la carretera ENACO-Abra Ccorao?
- **Problema específico N° 3:** ¿Cuál es la evaluación estructural usando la Viga Benkelman, del pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – C.C. Pumamarca, en la carretera ENACO-Abra Ccorao?
- **Problema específico N° 4:** ¿Cuál es el porcentaje vida remanente útil, a partir de la evaluación estructural con la Viga Benkelman, del pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – C.C. Pumamarca, en la carretera ENACO-Abra Ccorao?

1.2. Justificación e importancia de la investigación

1.2.1. Justificación técnica

El porcentaje de vida remanente útil, es un parámetro que se obtiene a partir de la razón entre el periodo de años que le falta a un pavimento



para cumplir su vida útil y el periodo inicialmente proyectado en el diseño del pavimento; este parámetro, se calcula en base de una evaluación de tipo funcional o estructural en cualquier pavimento y en cualquier etapa de su vida útil.

De las metodologías existentes para una evaluación funcional, se eligió el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), por ser un parámetro relacionado con los procedimientos constructivos de extensión y compactación de los materiales constituyentes en las capas del pavimento.

La Viga Benkelman fue elegida como metodología de evaluación estructural, que mide las distancias de recuperación en la superficie del pavimento, al hacer transitar una carga normalizada sobre los puntos de muestreo en el tramo de prueba. De la interpretación del cuenco de deflexiones en cada tramo se realiza la evaluación estructural del pavimento.

Por lo comentado líneas arriba se aprecia que puede existir una correlación entre los parámetros de vida remanente útil entre las evaluaciones de tipo funcional y estructural de un pavimento elegidas en la presente investigación.

1.2.2. Justificación social

La presente investigación benefició a los pobladores del Sector de T'icapata y C.C. de Pumamarca, al facilitar 03 puntos de Control Geodésicos tomados con el GPS diferencial marca Trimble R8s con el Datum WGS84, propiedad de la Universidad Andina del Cusco.

Se ubicó 01 Punto de Control Geodésico en la Comunidad de Pumamarca y 02 Puntos de Control Geodésicos en el Sector de T'icapata. Cada punto de control se encuentra debidamente monumentado con concreto y una varilla de acero al ras del suelo.



Los puntos de control fueron realizados previa autorización de los presidentes de las comunidades: Don Simon Colque presidente del Sector de T'icapata y Don Gregorio Castro Florez presidente de Comunidad Campesina de Pumamarca.

Los puntos de control se utilizan en habilitaciones urbanas, replanteo de linderos de predios, futuros proyectos de irrigación y otros. Se adjunta en los anexos los documentos de autorización e información a los presidentes comunales.

La presente investigación, se constituye como material de consulta para los estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Andina, al ser antecedente bibliográfico en futuras investigaciones en evaluaciones de cualquier tipo de pavimento.

Así mismo, se evaluó funcionalmente y estructuralmente el pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – C.C. Pumamarca de la carretera ENACO – Abra Ccorao, en donde se señala las deficiencias encontradas en dicho tramo de la carretera.

1.2.3. Justificación por vialidad

Los instrumentos que se utilizaron en la evaluación del pavimento, Equipos Topográficos y Viga Benkelman, se hallan disponibles y operativos en el Gabinete de Topografía y en el Laboratorio de Pavimentos, Concreto y Suelos de la Universidad Andina del Cusco, respectivamente. Para los ensayos de campo complementarios de Levantamiento Topográfico y replanteo, los equipos de GPS Diferencial Trimble y Estación Total Leica, también se encontraron disponibles en el Gabinete de Topografía.

En cuanto a la viabilidad bibliográfica para realizar los ensayos, la investigación se fundamentó en los libros de la biblioteca de la Universidad Andina del Cusco y normas de Organismos Nacionales, especializados en temas de transporte como el Ministerio de Transportes



y Comunicaciones – MTC y la Metodología del Consorcio de Rehabilitación Vial- CONREVIAL, MTC – Perú.; u organismos internacionales como Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras Estatales- AASHTO y Sociedad Americana para Pruebas y Materiales – ASTM, disponibles en la Web.

En cuanto a la viabilidad social, previo a cada ensayo anteriormente descrito se realizaron coordinaciones con los presidentes del Sector de Tikapata y CC de Pumamarca. En la evaluación estructural con la Viga Benkelman, se realizó coordinación con la Policía Nacional del Perú – PNP, pues se cerró un carril al realizar las mediciones con la Viga en el pavimento.

1.2.4. Justificación por relevancia

La relevancia de la investigación, reside en la posibilidad de correlacionar los parámetros de porcentaje de vida remanente útil, calculados a partir de una evaluación funcional con equipos topográficos (mira y nivel) y una evaluación estructural con la Viga Benkelman. Generalmente los procedimientos de evaluación estructural, de un sistema pavimento-subrasante son relativamente un poco más costosos que los de una evaluación funcional.

En nuestro país no se realiza a nivel de gobiernos municipales y regionales, proyectos de evaluación de pavimentos en cualquiera de sus tipos, sea funcional o estructural; debido factores netamente presupuestales y burocráticos. Generalmente, la decisión de intervención por parte de las gerencias responsables, del pavimento de una carretera se realiza de manera subjetiva, es decir, visualmente.

1.3. Limitaciones de la investigación

1.3.1. Limitaciones geográficas

La carretera ENACO – Abra Ccorao, es una vía que facilita el tránsito entre la carretera longitudinal de la sierra sur PE-3S (paradero ENACO en la Av. La Cultura), con la carretera Cusco – Pisac PE-28G (abra Ccorao).



Figura 1. Departamento del Cusco
Fuente: Wikipedia



Figura 2. Provincia del Cusco. Fuente:
Google maps



Figura 3. Tramo Sector T'icapata – C.c. Pumamarca. Fuente: Google
Earth 2019



Tabla 2.- Coordenadas UTM del punto de partida

Inicio:	Sector T'icapata
X (UTM):	185152.9848
Y (UTM):	8503565.1563
Z(Altitud):	3441.623
Zona:	19S
Hemisferio:	Sur

Fuente: Levantamiento Topográfico propio

Tabla 3.- Coordenadas UTM del punto final

Final:	C.c. Pumamarca
X (UTM):	183945.8534
Y (UTM):	8505036.5153
Z(Altitud):	3557.809
Zona:	19S
Hemisferio:	Sur

Fuente: Levantamiento Topográfico propio

1.3.2. Limitaciones internas

- La evaluación funcional y estructural se limitó al tramo del pavimento flexible entre el Sector T'icapata – CC Pumamarca, de la carretera ENACO – Abra Ccorao.
- Los puntos de control P.C.1 y P.C.2 georreferenciados con el GPS Diferencial Trimble del Gabinete de Topografía fueron tomados con el Datum WGS84. Posteriormente en el Levantamiento Topográfico con la Estación Total, se utilizó para la programación en la orientación por coordenadas los puntos de control anteriormente mencionados con un error de ± 2.8 cm. Esto es debido a las diferencias de las metodologías de funcionamiento de cada Equipo Topográfico, mientras que la Estación Total trabaja planimétricamente; el GPS Diferencial toma coordenadas en función de la forma Geoidal de la Tierra, obtenido de los satélites que circundan el globo terráqueo.
- Los ensayos de campo se subordinaron a la precisión que tienen los instrumentos del Gabinete de Topografía de la Universidad Andina del



Cusco. El GPS Diferencial Trimble R8s GNSS con un error de medición GNSS Estática de: Horizontal 3 mm + 0.1 ppm RMS, Vertical 3.5 mm + 0.4 ppm RMS; La Estación Total Leica TS06 Plus con una precisión angular Hz-V de 5", precisión de distancia a prisma 2.0 mm+2.0 ppm; El Nivel Automático Leica modelo NA728 con lentes de aumento 28X y una precisión de 2 mm; El Dial ELE de la Viga Benkelman tuvo una precisión de 0.05 mm; La Balanza Electrónica del Sur ubicado en Carretera Cusco-Abancay Km 16.5 con una precisión de 10 kg.

- Previo a la evaluación funcional del pavimento flexible en el Tramo Sector T'icapata – CC Pumamarca, de la carretera ENACO – Abra Ccorao; se pronosticó a priori un IRI fluctuante entre [3-5] m/km, por la pendiente de la vía. Posteriormente, se optó por una Nivelación de Clase 2, con el Nivel Automático Leica modelo NA 728 de 2 mm de precisión, de acuerdo al Método de prueba estándar para medir la rugosidad de la carretera mediante el método de nivel estático, E 1364 – 95(2005), de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales - ASTM.
- El ensayo de evaluación estructural con la Viga Benkelman fue ejecutado en el mes de Setiembre, motivo por el cual la prueba estuvo sujeta a un factor de corrección estacional, propio de la Metodología del Consorcio de Rehabilitación Vial- CONREVIAl, MTC – Perú.
- Se consideró las diferentes pendientes longitudinales del tramo evaluado estructuralmente con la Viga Benkelman, pues, la plomada(cadena) colocada en la parte posterior del camión, no tenía una verticalidad adecuada con respecto al eje longitudinal del pavimento. Se realizaron correcciones de la medida entre el eje de la rueda y la plomada, para diferentes pendientes de la vía.

1.3.3. Limitaciones externas

- Se colocó señales informativas, preventivas, conos de seguridad, chalecos de seguridad, cascos de seguridad, etc. Además, de personal que ordene el tráfico generado en los ensayos de evaluación



funcional y estructural del pavimento flexible del tramo Sector de T'icapata – CC Pumamarca.

- En la evaluación estructural con la Viga Benkelman, el camión previamente cargado y pesado con 8.2 toneladas en el eje posterior con piedra chancada de 1/2"; se cubrió la tolva del camión con plástico, de manera que se minimice la absorción de humedad por material precargado.

1.4. Objetivo de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Estimar los valores de vida remanente útil, a partir de una evaluación funcional con el Equipo Topográfico de Mira - Nivel y una evaluación estructural con la Viga Benkelman, en el pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – C.C. Pumamarca, en la carretera ENACO- Abra Ccorao.

1.4.2. Objetivos específicos

- **Objetivo específico N° 1:** Determinar el nivel de serviciabilidad con el Equipo Topográfico de Mira y Nivel, del pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – C.C. Pumamarca, en la carretera ENACO- Abra Ccorao.
- **Objetivo específico N° 2:** Estimar la vida remanente útil a partir de la evaluación funcional con el Equipo Topográfico de Mira y Nivel, del pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – C.C. Pumamarca en la carretera ENACO-Abra Ccorao.
- **Objetivo específico N° 3:** Efectuar una evaluación deflectométrica, hallando parámetros de Radio de Curvatura, Deflexión Característica y Deflexión Admisible; en pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – C.C. Pumamarca en la carretera ENACO-Abra Ccorao.



- **Objetivo específico N° 4:** Estimar la vida remanente útil a partir de la evaluación estructural con la Viga Benkelman, del pavimento flexible del tramo Sector T'icapata – C.C. Pumamarca en la carretera ENACO-Abra Ccorao.

2. Capítulo II: Marco teórico

2.1. Antecedentes de la tesis o investigación actual

2.1.1. Antecedentes a nivel local

Autores: Sánchez Acurio, Carlos Fernando
Gutiérrez Medina, Cristian Gustavo

Título: Análisis de la capacidad vial y nivel de servicio de la carretera San Sebastián – Ccorao de la Provincia del Cusco – Cusco

Lugar: Cusco

Institución: Universidad Andina del Cusco

Año: 2017

Tipo de Investigación: Tesis de Pregrado

Resumen: Se evaluó la capacidad vial recurriendo al High Capacity Manual 2010 (HCM 2010), y el nivel de servicio basándose en el manual de conservación vial e inventarios viales del MTC, en la carretera San Sebastián-Corao de la provincia del Cusco. También, determinó el índice de condición superficial del pavimento con metodología francesa VIZIR.

Conclusiones: La investigación llegó a determinar las capacidades viales en el Tramo I y II de 986 vehículos/hora y en el Tramo III de 841.5 vehículos/hora; los tres tramos se encuentran por debajo de la capacidad vial básica de la vía, el cual es 3200 vehículos/hora. Se determinó un nivel de servicio E en los tres tramos evaluados por debajo del nivel de servicio A ideal.

Aporte a la Tesis: La investigación representa un antecedente histórico, geográfico y evaluativo para el desarrollo de la presente tesis, pudiéndose comparar la evolución de las fallas, evolución de índice de



rugosidad internacional (IRI) e incremento del tráfico en el año 2017, con evaluaciones similares actuales.

Autores: Gómez Allende, Gary Rossano

Quispe Mejía, José Luis

Título: Evaluación de la seguridad vial – nominal de la carretera ENACO – Abra Ccorao de acuerdo a la consistencia del diseño geométrico

Lugar: Cusco

Institución: Universidad Andina del Cusco

Año: 2017

Tipo de Investigación: Tesis de Pregrado

Resumen: La investigación determinó la consistencia de diseño y seguridad vial – nominal de la carretera ENACO – Abra Ccorao, se realizó estudios de tráfico, levantamiento topográfico, características geométricas de la vía a detalle, medición de las velocidades de operación del percentil 85 en curvas – tangentes en campo; y estimación en gabinete de valores a través de la metodología Fitzpatrick y Lamm, luego comparandolas con las directrices normadas en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras MDG-2014 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Conclusiones: La investigación llegó a estimar que las velocidades en curvas, el 60% se ubica dentro del rango establecido, según las fórmulas propuestas por Fitzpatrick. Las velocidades de operación en tangentes el 75.86% se hallan dentro del rango establecido por las ecuaciones de Lamm. Se calificó la vía como insegura, pues el 41.66% de la longitud total de la carretera es de diseño pobre o tolerables, según el criterio II de Lamm.

Aporte a la Tesis: La investigación representa un antecedente geográfico actual (2017) para la presente tesis, pudiéndose comparar o



extrapolar valores de estudio de tráfico con estudios similares actuales y datos generales de la carretera ENACO – Abra Ccorao.

2.1.2. Antecedentes a nivel nacional

Autor: Balarezo Zapata, Javier

Título: Evaluación estructural usando Viga Benkelman aplicada a un pavimento

Lugar: Piura

Institución: Universidad de Piura

Año: 2017

Tipo de Investigación: Tesis de Pregrado

Resumen: La investigación propone una metodología procedimental para la evaluación estructural en pavimentos flexibles y concreto, con la Viga Benkelman. La tesis comienza con la recolección de los datos de campo en el pavimento del campus de la Universidad de Piura, luego se cargó en el software de Matlab, el Modelo de Hogg y los monogramas, a partir de ellos es posible interpretar los cuencos de deflexiones recolectados en el campo. Finalmente se calculó el espesor del refuerzo estructural para el pavimento con una proyección de 20 años, obteniéndose un espesor de 3 cm de asfalto necesarios para cumplir con el Número Estructural - SN requerido para esta proyección en el pavimento.

Conclusiones: Recomienda la incorporación en la evaluación de los pavimentos de competencia de los gobiernos locales y regionales, el uso de la Viga Benkelman. De manera que se establezca cuantitativamente la necesidad de mantenimiento o rehabilitación de una vía. Destaca la utilidad del parámetro del Numero Estructural Efectivo – Sneff, en el rediseño de un pavimento que está llegando al final de su vida útil. Recalca que la Viga Benkelman es una alternativa importante de uso simple y a un bajo costo en la evaluación de pavimentos.



Aporte a la Tesis: El antecedente se utilizó como una guía de elaboración de métodos de procesamiento de datos (numéricos y monogramas) en MatLab, para la interpretación de las deflexiones obtenidas en los ensayos de campo, con la finalidad de corroborar el comportamiento del pavimento evaluado.

Autor: Carrera Huamanchumo, Guillermo Justiniano

Título: Control de la deflexión vertical con la Viga Benkelman monitoreo de conservación carretera Cañete-Huancayo km.110+000 al km. 112+000

Lugar: Lima

Institución: Universidad Nacional de Ingeniería

Año: 2010

Tipo de Investigación: Informe de Suficiencia

Resumen: Se evaluó estructuralmente con la Viga Benkelman, un estudio de tráfico e inventario vial en un Sistema de Información Geográfica, en la carretera Cañete-Huancayo, tramo Km 110+000 – Km 112+000. Posteriormente, en gabinete usando la Metodología del Consorcio de Rehabilitación Vial- CONREVIAL, MTC – Perú, se estimó parámetros como el radio de curvatura, deflexión característica y deflexión admisible con la finalidad de establecer un mantenimiento programado en el tramo evaluado.

Conclusiones: Se determinó que la vía en evaluación no requiere de un reforzamiento estructural, pues, sólo presenta fallas en la carpeta asfáltica. Hizo énfasis en que la evaluación al tramo de la carretera Cañete-Huancayo, no es representativa para ser comparada con los datos obtenidos por el convenio UNI-PROVIAS, pues difiere en los puntos de ensayo. Los deflectogramas obtenidos tanto de la investigación, como del convenio UNI-PROVIAS, se hallan por debajo de la deformación admisible en el tramo evaluado en el pavimento de la carretera Cañete-Huancayo.



Aporte a la Tesis: El antecedente representa una guía metodológica, pues el tipo de ensayo usando la Viga Benkelman es utilizado en la evaluación del pavimento flexible en la presente investigación, ambos basados en artículos, guías y normas para la evaluación deflectométrica del pavimento.

Autor: Ronald Eduardo Carahuatay Chávez

Título: Determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera San Miguel – Pablo, tramo San Miguel – Sunuden mediante el análisis deflectométrico

Lugar: Cajamarca

Institución: Universidad Nacional de Cajamarca

Año: 2015

Tipo de Investigación: Tesis

Resumen: Se determinó el comportamiento estructural del pavimento flexible en la carretera San Miguel – San Pablo, tramo San Miguel – Sunuden, donde se realizó un análisis deflectométrico con la Viga de Benkelman, estudio de tráfico y estudios de suelos, para luego ser comparados en gabinete con los parámetros estipulados en la Metodología del Consorcio de Rehabilitación Vial- CONREVIAL, MTC – Perú.

Conclusiones: Concluyó que el pavimento de la carretera presenta una deflexión promedio de $137.12 \times 10^{(-2)}$ mm, superior a la deflexión admisible estimada de $108 \times 10^{(-2)}$ mm, calificándolo como un comportamiento estructural de mala calidad. Señala que el 68% unidades de muestra presentan un mal comportamiento de la subrasante – estructura del pavimento, pues, presentan radio de curvaturas y deflexiones que exceden a los parámetros permitidos por la Metodología del Consorcio de Rehabilitación Vial- CONREVIAL, MTC – Perú.



Aporte a la Tesis: El presente antecedente realizó ensayos adicionales con formatos en mecánica de suelos y estudios de tráfico, los cuales, se tomaron como modelo a la hora de elaborar los formatos de la presente investigación.

2.1.3. Antecedentes a nivel internacional

Autores: Bohórquez Godoy, Herley
Leal Hernández, Ingrid Patricia
Torres Bobadilla, Sergio Andrés

Título: Instructivo técnico para la operación, evaluación, diagnóstico y diseño de rehabilitación de pavimentos flexibles a través del análisis de medidas de deflexión con dispositivo de carga estática no continua Viga Benkelman.

Lugar: Colombia

Institución: Universidad Cooperativa de Colombia, sede Villavicencio

Año: 2014

Tipo de Investigación: Monografía de Grado

Resumen: La monografía tuvo como finalidad sociabilizar las aplicaciones de la Viga Benkelman, por ello, representa un instructivo práctico para futuras investigaciones, en donde se proponga evaluar un pavimento con fines de operación, evaluación, diagnóstico diseño de rehabilitación. Luego se operó la Viga Benkelman en la Vía Veredal del Municipio de Villavicencio, utilizando en gabinete normas nacionales e internacionales referenciales establecidas en Instituto Nacional de Vías - INVIAS y la Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras Estatales- AASHTO, al final propone una rehabilitación de la mencionada vía.

Conclusiones: Se constituye como un instructivo audio visual sobre el uso de la Viga Benkelman de brazo doble, para su utilización pedagógica en la línea geotecnia y vías. Se identificó un solo tramo homogéneo de comportamiento bueno, en la evaluación deflectométrica con la Viga



Benkelman del pavimento flexible de la vía veredal del Municipio de Villavicencio.

Aporte a la Tesis: El antecedente representa un instructivo para la operación en campo de la Viga Benkelman, además, de una guía metodológica en la obtención, análisis y utilización de los datos en la evaluación estructural realizada en la presente investigación.

Autores: S. Hoffman, Mario
M. del Águila, Pablo

Título: Estudio de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (Ensayos no destructivos)

Institución: Louis Berger International, INC

Año: 1985

Tipo de Investigación: Informe

Resumen: El informe consistió en desarrollar e implementar, en distintos países por Louis Berger International INC, una metodología que permita una fácil medición, procesamiento, análisis e interpretación de curvas de deflexión obtenidas en una evaluación estructural a un pavimento. Para ilustrar la metodología, finalizando el informe se da un ejemplo de evaluación estructural utilizando la Viga Benkelman, en la carretera Talara – Cancas, a modo de exponer el potencial de su verificación y análisis de las soluciones.

Conclusiones: Para procesar los datos obtenidos en una evaluación estructural con la Viga Benkelman, se deben de diferenciar los datos de entrada (inputs) en 4 grupos: datos de carga (P y p), deflexiones medidas (D_0 , DR y R), datos de pavimento (espesores y características de las capas) y parámetros de modelo (H/L_0 y μ). La metodología produce los siguientes datos de salida (outputs): longitud característica (L_0), módulo de elasticidad de la sub-rasante (E_0) y módulo de elasticidad compuesto



(E*). Posteriormente, se compara cada uno de los parámetros de salida obtenidos en campo con los obtenidos teóricamente, identificándose zonas del pavimento que requieren mantenimiento o rehabilitación.

Aporte a la Tesis: El informe representa una guía didáctica y teórica que permitió entender e interpretar los datos obtenidos en la evaluación estructural de carga estática o cuasi-estática no continua, Viga Benkelman.

2.2. Aspectos teóricos pertinentes

2.2.1. Definición de pavimento

Diversos autores sobre la estructura del pavimento la definen de múltiples maneras, podemos mencionar algunas de ellas:

- El pavimento es una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Por lo general está conformada por las siguientes capas: base, sub-base y capa de rodadura. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones - MTC, 2013, págs. 23,24)
- Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito les transmite durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento. (Montejo, 2006, pág. 2)
- Un pavimento es una estructura: que consta de unos materiales que, sometidos a la acción de unas cargas, experimentan tensiones y deformaciones, transmitiendo esas cargas terreno de explanación y a las capas situadas bajo ella, que constituyen el cimiento de un pavimento. (Recuenco, 2017, pág. 7)



2.2.1.1. Pavimento Rígido

El Ministerio de Transporte y Comunicaciones – MTC (2013), lo define como aquella que presenta un sub-base granular, o incluso puede tener una base granular estabilizada y una capa de rodadura de losa de concreto. Puede ser simple con juntas, juntas con refuerzo de acero o con refuerzo continuo.

2.2.1.2. Pavimento Flexible

La parte superior de estos pavimentos se denomina carpeta asfáltica y es la que soporta directamente la acción del tráfico. Está construido por una o dos capas de mezcla bituminosa (rodadura e intermedia) o, para tráficos de baja intensidad, por un tratamiento superficial. (Recuenco, 2017, pág. 10)

En el Perú, generalmente en el diseño de los pavimentos flexibles, se consideran las siguientes capas, los cuales, son definidas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC (2013) como:

- **Capa de rodadura:** Es la parte superior de un pavimento, que en el caso de los pavimentos flexibles son del tipo bituminoso, su función es sostener directamente el tránsito.
- **Base:** Es la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función de sostener, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa será de material granular drenante (CBR $\geq 80\%$) o será tratada con asfalto, cal o cemento.
- **Sub-base:** Es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la carpeta. Además, se utiliza como una capa de drenaje y controladora de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta capa puede obviarse.



Esta capa puede de ser de material granular ($CBR \geq 40\%$) o tratada con asfalto, cal o cemento.

2.2.1.3. Pavimento Semirrígido

“Aunque éste tipo de pavimentos guarda básicamente la misma estructura de un pavimento flexible, una de sus capas se encuentra rigidizada artificialmente con un aditivo que puede ser: asfalto, emulsión, cemento, cal y químicos” (Montejo, 2006, pág. 5)

2.2.2. California Bearing Ratio (CBR)

Según Bowles (1981), refiere: El ensayo de CBR mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de un soporte, el cual, varía en función al estado del suelo en cada ensayo.

El ensayo es en realidad una prueba de punzonamiento, que se realiza sobre un suelo compactado al Proctor exigible en obra, en un molde cilíndrico en condiciones de saturación, después de estar inmerso en agua durante cuatro días.

Muchas veces no se dispone de un laboratorio a la mano, y siendo además un ensayo de cierto costo, la determinación del valor soporte de los suelos (CBR) se podría realizar siguiendo métodos que utilizan variables complementarias, principalmente en caminos vecinales donde resultan económicos y adecuados a la hora de proyectar o ejecutar la vía. Entre otros, tenemos los planteados por ingenieros Peltier (Francés) y Trocchi (Italiano), y su validez está limitada a aquellos suelos con CBR menores a 20%. (Barreto, 1998, pág. 21).

A continuación, se muestra un cuadro en donde el Ministerio de Transportes y Comunicaciones da algunas observaciones y especificaciones sobre el rango de variación de éste parámetro.



Tabla 4. Acción del pavimento a nivel de sub-rasante

Clasificación MTC de la subrasante	¿Se originan problemas estructurales en el pavimento?	Condición del pavimento	Acción del pavimento
Inadecuada CBR<3%	Si	Daño en toda la estructura	Reconstrucción del pavimento y mejoras en el terreno de fundación
Pobre 3%≤CBR<6%	Si	Con problemas estructurales	Reconstrucción del pavimento y mejoras en el terreno de fundación
Regular 6%≤CBR<10%	No	Estructura óptima	Evaluar si existe carencia estructural
Buena 10%≤CBR<20%	No	Estructura óptima	Evaluar si existe carencia estructural
Muy buena 20%≤CBR<30%	No	Estructura óptima	Evaluar si existe carencia estructural
Excelente 30%≤CBR	No	Estructura óptima	Evaluar si existe carencia estructural

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones - MTC

2.2.3. Factores principales externos que influyen en el pavimento.

2.2.3.1. Tránsito

Recuenco (2017), refiere sobre el tránsito que es el factor más importante a considerar, tanto en el diseño como en una evaluación; pues éste se le puede comparar como las cargas que son transmitidas y disipadas por toda la estructura del pavimento. En el diseño de pavimentos todos los métodos, transforman los vehículos en cargas de ejes equivalentes que tendrá que soportar de un solo vehículo. En la evaluación de pavimentos para hallar el porcentaje de vida remanente útil se tiene que hallar aproximadamente el número de ejes equivalentes que transitaron hasta la fecha de evaluación.



2.2.3.2. Clima

Los factores que en nuestro medio más afectan a un pavimento son las lluvias y los cambios de temperatura.

Las lluvias por su acción directa en la elevación del nivel freático influyen en la resistencia, la compresibilidad y los cambios volumétricos de los suelos de sub-rasante especialmente. Este parámetro también influye en algunas actividades de construcción tales como el movimiento de tierras y la colocación y compactación de capas granulares y asfálticas. (Montejo, 2006, pág. 8)

2.2.3.3. Subrasante

De la calidad de esta capa depende, en gran parte, el espesor que debe tener el pavimento, sea éste flexible o rígido. Como parámetro de evaluación de esta capa se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo cargas del tránsito. Es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las evaluaciones de variaciones del volumen. Los cambios de volumen de un suelo de sub-rasante de tipo expansivo pueden ocasionar graves daños en las estructuras que se apoyen sobre éste. (Montejo, 2006, pág. 9)

2.2.4. Tipos de fallas en los pavimentos asfálticos

2.2.4.1. Fallas del tipo funcional

También llamadas fallas de superficie, comprende los defectos de la superficie de rodamiento debidos a fallas de la capa asfáltica y no guardan relación con la estructura de la calzada. La corrección de estas fallas se efectúa sólo con regularizar la superficie y le confiere la necesaria impermeabilidad y rugosidad. Ello se logra con capas asfálticas delgadas que poco aportan desde el punto de vista estructural en forma directa. (Montejo, 2006, pág. 158)



2.2.4.2. Fallas del tipo estructural

Montejo (2006) define a la falla estructural como: (...) defectos de la capa de rodadura cuyo origen es una falla en la estructura del pavimento, es decir, en una o más de las capas constituidas que deben de resistir el complejo juego de sollicitaciones que impone el tránsito y el conjunto de factores climáticos regionales. En la corrección de este tipo de fallas es necesario un refuerzo en el pavimento existente para que el paquete estructural responda a las exigencias del tránsito presente y futuro estimado. Se hace pues necesario el diseño de una estructura nueva formada por las subrasante – pavimento – refuerzo (pág.159)

2.2.4.3. Causas de las fallas en el pavimento

Las fallas tanto estructural como funcional, se derivan en dos causas fundamentales:

- Si la capacidad mencionada es excedida más allá del valor que determinan las deformaciones recuperables por elasticidad instantánea y retardada, se desarrollan deformaciones permanentes en cada aplicación de las cargas, las que se acumulan modificando los perfiles de la calzada hasta valores que resultan intolerables para la comodidad, seguridad, y rapidez del tránsito y aún pueden provocar el colapso de la estructura.
- Si la capacidad mencionada no es excedida pero las deformaciones recuperables son elevadas, los materiales y en particular las capas asfálticas sufren el fenómeno denominado fatiga cuando el número de aplicaciones de las cargas pesadas es elevado, que se traduce en reducción de sus características mecánicas. En este caso la deformación horizontal por tracción en la parte inferior de las capas asfálticas al flexionar la estructura, puede exceder el límite crítico y se llega a la



iniciación de proceso de fisuramiento. (Montejo, 2006, pág. 159)

2.2.5. Características de tipo funcional de un pavimento

Recuenco (2017), expresa sobre las características funcionales de un pavimento como: Son características de los pavimentos, básicamente derivadas de las que presenta la capa de rodadura determinan en buena medida, la comodidad y seguridad del usuario. Entre ellas destacan la regularidad superficial, la textura y resistencia al deslizamiento y en menor medida, el ruido. (pág. 305)

2.2.5.1. Irregularidad superficial

Se entiende por irregularidad superficial las diferencias verticales, en cota, entre la superficie teórica y al real del pavimento. Las irregularidades longitudinales y transversales son causa del cabeceo y del balanceo del vehículo. Estas se caracterizan por su longitud y su amplitud.

En el congreso mundial de carreteras, se definieron como irregularidades a las caracterizadas por longitudes de onda comprendidas entre 0.5 mm y 50m. Su denominación y efectos son función de esta longitud, distinguiéndose la microtextura y a macrotextura ya estudiadas que son necesarias para garantizar un rozamiento neumático-pavimento suficiente y la falta de regularidad propiamente dicha, siempre indeseable. En situación intermedia se encuentra la megatextura que produce una rodadura más incómoda y alguna afección a la estabilidad del pavimento.

Es obvio que la medida de la regularidad superficial es necesaria y cabe distinguir tres situaciones en las que se deben de llevar a cabo:

- a. Durante la construcción de las obras, para controlar los métodos constructivos.



- b. Al finalizar la construcción a fin de conocer si se han satisfecho las condiciones impuestas.
- c. Durante la vida útil de la carretera para conocer su estado y evolución

Los indicadores de regularidad se utilizan para resumir, de manera simplificada el estado de esta variable, que influye en los pasajeros, los vehículos en el pavimento. No todos los indicadores dan idea de todos estos efectos y puede plantearse si es necesario utilizar más de un indicador para evaluar los distintos efectos de la regularidad superficial.

Para este fin cabe pensar en un modelo de vehículo que represente un cuarto de coche con todas las masas y resortes del pavimento.

Los equipos que se han inventado para la utilización de la regularidad se tienen:

1. Equipos que miden directamente la regularidad superficial.
2. Equipos que obtienen el perfil longitudinal de la carretera, del que se deduce el indicador.

Los equipos que se utilizan son:

- La regla fija de tres metros, el cual mide la distancia máxima entre la regla y superficie del firme en cualquier posición de la regla.
- La regla rodante de 3 metros
- Viógrafo
- Perfilógrafos
- ARS (Recuenco, 2017, pág. 305)

2.2.5.2. Índice de servicio

Es el grado de comodidad que la vía brinda al usuario. Existen diferentes maneras para analizar y cuantificar el grado de servicio. Un parámetro usado es el índice de servicio (Índice de Serviciabilidad Presente– PSI), que establece una escala subjetiva de calificación de 0 a 5, siendo un 5 la condición calificada como excelente. Otro indicador es la rugosidad, o irregularidades en el pavimento, que en buena cuenta son ondas



multifrecuencia de diferente amplitud y longitud de onda, que pueden ser analizadas utilizando Transformadas de Furier. Los datos para calcular la rugosidad pueden ser obtenidos mediante una nivelación de precisión, perfilómetros ópticos tipo laser o, perfilómetros tipo respuesta como el “Bump Integrator” entre otros, y es usualmente expresada en términos de IRI (Índice Internacional de Rugosidad). (Chang, 2012, pág. 9)

2.2.5.3. Forma y textura superficial

La presencia de partículas alargadas o aplanadas puede afectar la trabajabilidad, la resistencia y la durabilidad de las mezclas de concreto, porque tienen a orientarse a un solo plano, lo cual dificulta la manejabilidad; además debajo de las partículas se forman vacíos con aire por la acumulación de agua bajo éstas durante el mezclado perjudicando las propiedades de la mezcla endurecida. De otra parte, las texturas superficiales de las partículas del agregado influyen en la manejabilidad y la adherencia entre la mezcla y el agregado, por tanto, afecta la resistencia. (Montejo, 2006, págs. 20,21)

2.2.5.4. Regularidad superficial

Se define como regularidad superficial de una carretera a la mayor o menor aproximación del perfil real al teórico que es aquel que no produce, dentro de un vehículo en marcha, aceleraciones verticales. La cuantificación de la regularidad se puede realizar con la medida de diferentes magnitudes. La evaluación del grado de irregularidad de una carretera debe de efectuarse tanto en sentido longitudinal como transversal. En la actualidad se considera que determinadas ondulaciones de un perfil tienen relación directa con el grado de deterioro de la sección estructural, pero existen otras de diferente longitud de onda que además que afectan la seguridad y comodidad del usuario. En relación a la sección estructural la irregularidad de una carretera no solo está relacionada con el grado



de deterioro, sino que además lo acelera ya que el paso de los vehículos aumenta las cargas dinámicas que estos producen al existir fenómenos de impacto con el consiguiente aumento de esfuerzos tangenciales y verticales. (Montejo, 2006, pág. 216)

2.2.6. Evaluación funcional de un pavimento por medio del Índice de rugosidad Internacional (IRI)

2.2.6.1. Antecedentes del Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

W. Sayers (1995) en su artículo nos da una breve descripción sobre los antecedentes del uso de éste parámetro. El parámetro de Índice de Rugosidad Internacional fue introducido en el denominado simulación de cuarto de coche, en la década de 1960, desde entonces evolucionó durante muchos años hasta la actualidad. Inicialmente empresas como General Motors, Brp Roughometer, Chevrolet Impala, etc.; desarrollaron vehículos que permitan la evaluación funcional de pavimentos en base al propósito del índice.

La National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) en la década de los 1970, introdujo el concepto de Coche de Oro, con el que buscó correlaciones con otros métodos y experimentos de evaluar funcionalmente el pavimento. También, desarrolló la calibración con métodos de rendimiento mayor como son los Sistemas Tipo Respuesta. De entre todos los métodos la mejor correlación fue obtenida con los parámetros de un vehículo denominado Coche de Oro.

En 1982 el Banco Mundial desarrolló en Brasil la correlación y calibración de las medidas de rugosidad, a su vez, desarrolló el concepto de Índice de Rugosidad Internacional (IRI), en base a importantes criterios como: relevancia, transportabilidad y estabilidad en el tiempo.



2.2.6.2. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales – ASTM (2012) define en su norma E867 a éste parámetro como: “La desviación de una superficie verdadera superficie plana con dimensiones características que afectan la dinámica del vehículo y la calidad de tránsito”.

Según Pradena Miguel (2006) refiere que, el IRI es un parámetro estadístico de irregularidad del pavimento, el cual, es objetivo y se puede obtener del análisis de la medición de un perfil del ahuellamiento. Este parámetro compara la superficie teórica, es decir, la recta o parábola continua perfecta ($IRI=0$), con el perfil longitudinal vial, cuyas irregularidades se deben al proceso constructivo y la utilización de la vía. A partir de éste parámetro se puede extraer la información como la vida útil o vida útil remanente de un pavimento.

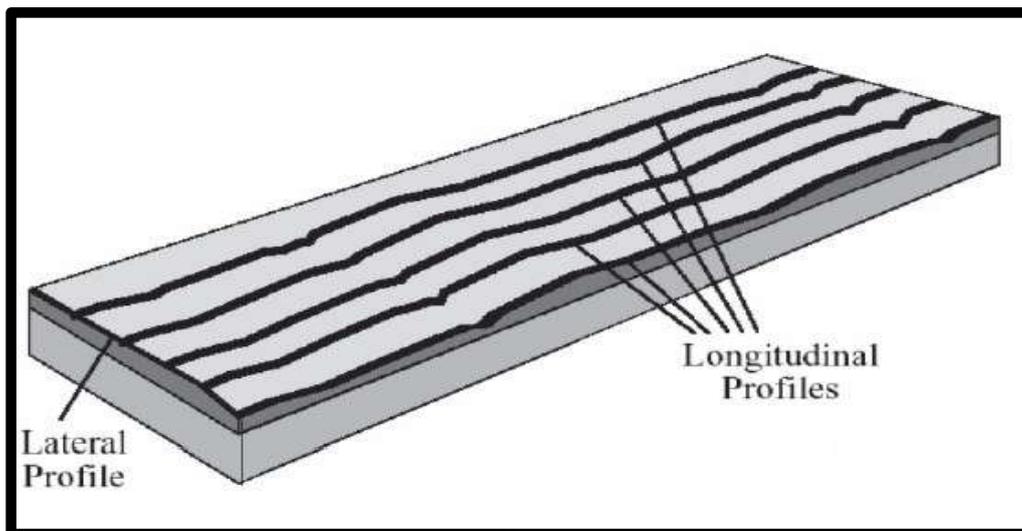


Figura 4. Perfiles longitudinales que se presentan en una vía. Fuente: Pradena Miguel (2006)

2.2.6.3. Determinación del Índice de Rugosidad del Pavimento (IRI)

Según Badilla Vargas (2009), indica que, para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional, se necesitan herramientas matemáticas, estadísticas y computacionales, los cuales permiten obtener un parámetro que está relacionado a cada camino.



Éste cálculo se basa en la obtención de las elevaciones de las cotas, es decir, del perfil longitudinal del pavimento. Por tanto, es independiente del instrumento o técnica usada en obtener el perfil. Actualmente se cuenta con instrumentos que, permiten obtener el perfil o el parámetro IRI desde de una manera simple hasta los más sofisticados. A continuación, se muestra una tabla comparativa de los diversos instrumentos que pueden medir el Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

El Banco Mundial recomienda rangos del Índice de Rugosidad Internacional – IRI, en los diferentes etapas y tipos de pavimentos.

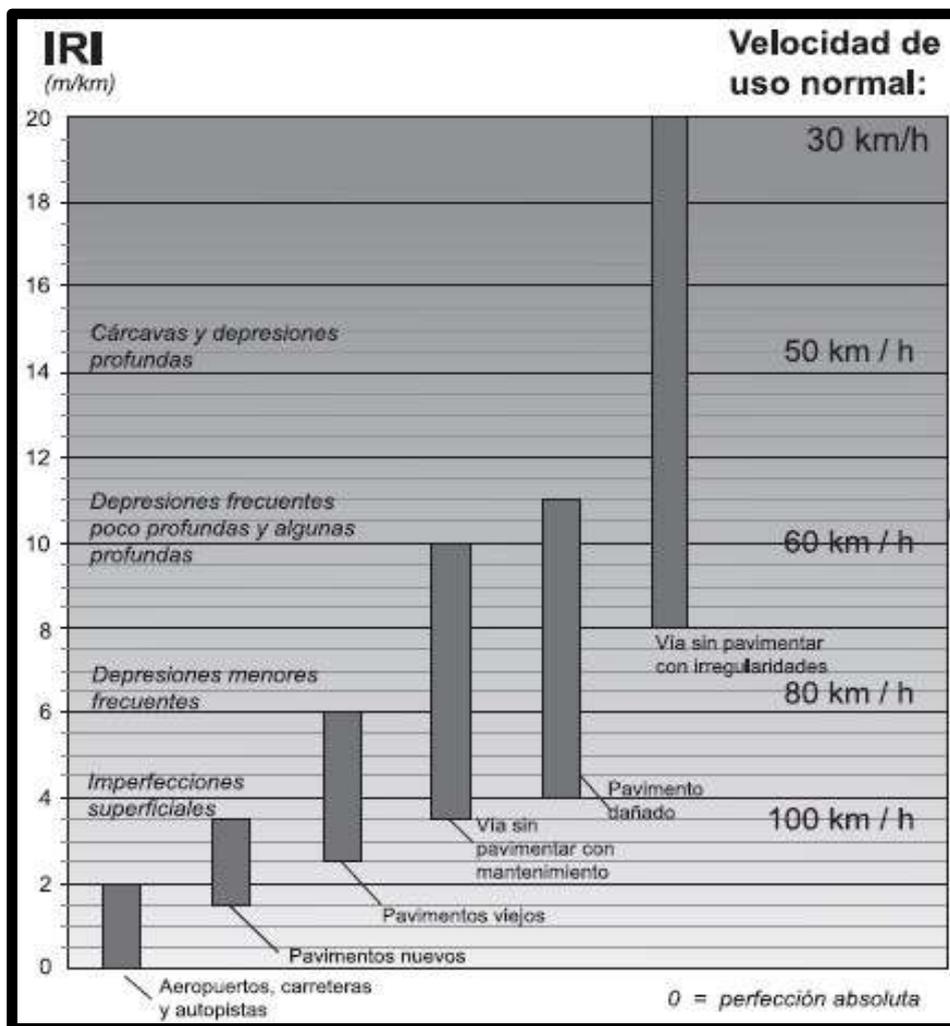


Figura 5. Escala estándar emleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI. Fuente: World Bank (Recuperado en Badilla,2008)



1

Tabla 5. Equipos utilizados para la medición de regularidad superficial de un pavimento

Equipo	Grado de Precisión	Implementación	Complejidad del Equipo	Observaciones
Nivel y mira topográfica	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Simple	Poco práctico y costos muy elevados para proyectos largos
Disptick	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Simple	Poco práctico y costos muy elevados para proyectos largos
Perfilógrafos	Medio	Control de calidad y recepción de obras	Muy Simple	No son prácticos para evaluar la condición a nivel de red
Equipos Tipo Respuesta (RTRRMS)	Medio	Monitoreo de carreteras a nivel de red	Compleja	Los resultados no son transportables ni estables en el tiempo, pues dependen de la dinámica particular del movimiento del vehículo.
Perfilómetro inercial	Muy alto	Monitoreo de carreteras a nivel de red y recepción de proyectos viales	Muy compleja	Equipo de alta precisión, cuyos resultados son transportables y estables en el tiempo. Su principal uso es la evaluación de las redes viales grande. Muy costoso

2

Fuente: Ventura J. (tabla indicada en Badilla, 2008)

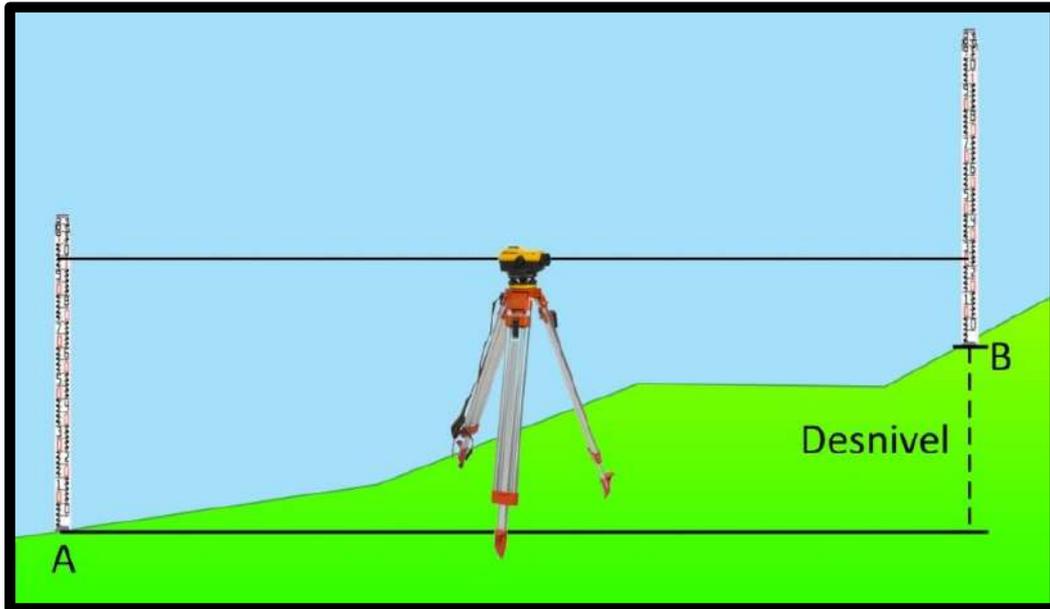


Figura 6. Mira y nivel topográfico. Fuente: www.albireotopografía.es



Figura 8. Equipo Dipstick. Fuente: Ventura J. (recuperado de B. Vargas (2009)).



Figura 7. Perfilógrafo de California. Fuente: www.Wikipedia.org



Figura 9. Rugosímetro de Merlin. Fuente: L. Hirpahuanca (Tesis de pregrado, 2016)



Figura 10. Bump Integrator. Fuente: www.Velciti.com



Figura 11. Perfilómetros inerciales laser. Fuente: www.equiposiri.com



Badilla Vargas (2008), indica que, el procedimiento luego de haber obtenido el perfil. Se somete éste, a un primer filtro que basado en herramientas estadísticas y matemáticas permite: simular el comportamiento de las llantas en la carretera y reducir la sensibilidad de tiene el parámetro IRI a el intervalo de muestreo. Posteriormente, se aplica un segundo filtro de consiste en la aplicación del modelo de cuarto de coche que se desplaza a 80 Km/h en donde se registra las características del camino en función a los desplazamientos verticales, que puede tener en el modelo del vehículo.

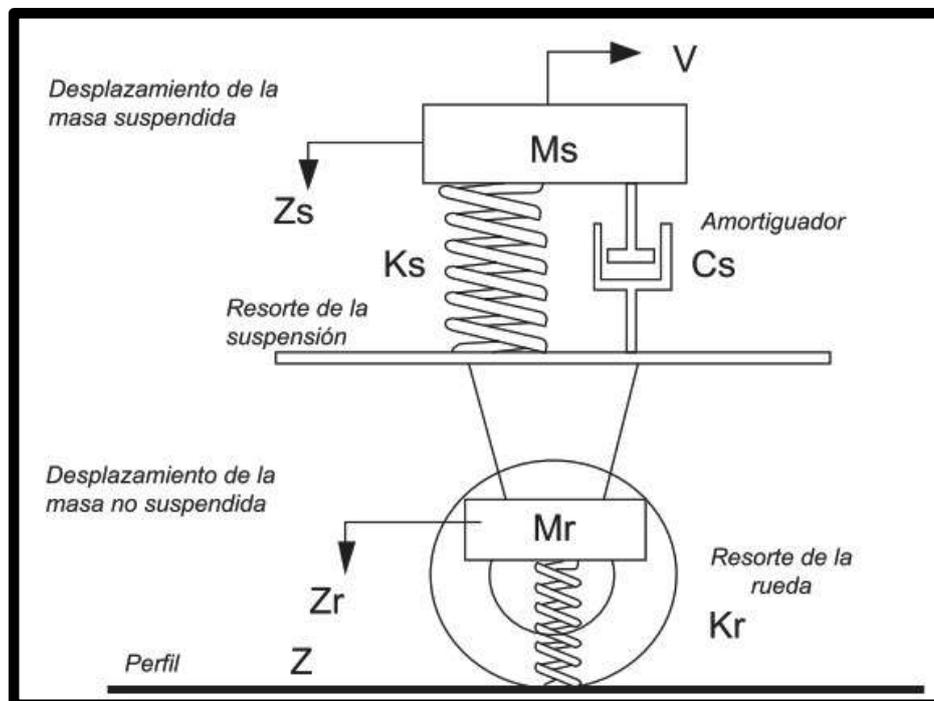


Figura 12. Modelo de masa resorte del Cuarto de Coche. Fuente: De Solminihac, H (Recuperado de Badilla Vargas, 2008)

El sistema indicado en la figura anterior, muestra el modelo de cuarto de coche, el cual consiste en masas, resortes y amortiguadores; que emulan al comportamiento de un cuarto de coche cuyos valores están normalizados por la AASHTO y ASTM. Por ello, a este sistema se le llama Cuarto de Coche de Oro.

2.2.6.4. Importancia del Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

- En el experimento de National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), llevó al equipo a evidenciar que, una mejoría del IRI en un 10 %, esto en el proceso constructivo, es decir, teniendo en cuenta las características geométricas de la vía como curvas verticales, curvas horizontales, pendientes, peraltes y otras; así como, la calidad y tecnología de la maquinaria junto a buenas prácticas constructivas. Lleva a incrementar en un 15 % la Vida Útil del pavimento que se está construyendo. Esto es debido a que valores bajos de IRI en un pavimento conllevan a una mayor cantidad de Ejes Equivalentes en el futuro.

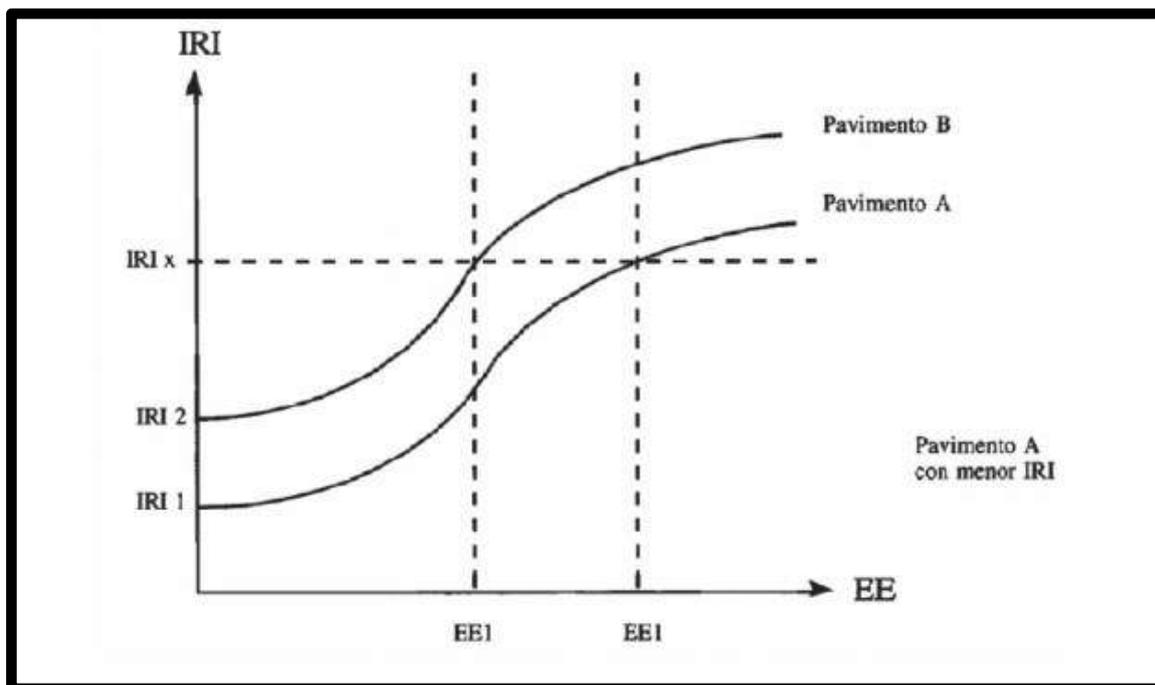


Figura 13. Curvas de para pavimentos con IRI inicial distintos. Fuente: Badilla Vargas (2009)

- Zhougloul S. (1996) concluyó sobre las variaciones del parámetro IRI, analizando variables como: el consumo de combustibles, los costos de mantenimiento de los vehículos, tiempo de mantenimiento y la vida útil de un pavimento. A



continuación, se presenta tales conclusiones en un cuadro comparativo.

Tabla 6. Cuadro comparativo entre valores altos y bajos de IRI

Valores altos de IRI	Valores bajos de IRI
Mayor costo de mantenimiento en las vías construidas.	Los pavimentos con una menor regularidad inicial, tienen valores de regularidad más bajos para los siguientes 10 años.
La vía presenta una vida útil inadecuada.	Los pavimentos con un regularidad menor inicial, tienen niveles de agrietamiento más bajos en los siguientes 10 años de su construcción.
Existe mayor posibilidad de una reconstrucción y rehabilitación a temprano tiempo.	Los pavimentos con un regularidad menor inicial, costos anuales medios de mantenimiento más bajos en los siguientes 10 años de su construcción.
Existe un consumo de combustible por parte de los vehículos usuarios de la vía.	En un periodo de 10 años, los ahorros anuales alcanzan en promedio US \$. 588 por carril.

Fuente: Zaghoul S (Citado en Badilla Vargas,2009)

- Montoya Goicochea (Tesis de maestría,2013) refiere que en el Proyecto de Rehabilitación de Transportes (PERT), en el año del 1995 incorporó nuevas especificaciones de técnicas de rugosidad, las cuales fueron incluidas para el control de recepción de obras. A partir de ello, El Ministerio de Transportes y Comunicaciones en su Manual de Especificaciones técnicas en la construcción 2000 – EG 2000, se establecieron controles de recepción del IRI en función al tipo de superficie construida:
 - 2.0 m/km para mezclas asfálticas en caliente y lechadas asfálticas
 - 2.5 m/km para tratamientos superficiales
 - 3.0 m/km para pavimentos de concreto hidráulico



Figura 14. Mediciones de rugosidad con Perfilómetro Laser Dynatest Mark realizadas en una red vial nacional asfaltada. Fuente: Recuperado de M. Goicochea (Tesis de Maestría ,2013)



Figura 15. Mediciones de rugosidad con el perfilómetro Inercial Roughmeter II realizadas en la concesión red vial N° 5. Fuente: Recuperado de M. Goicochea (Tesis de Maestría, 2013)

- A continuación, se muestran los valores recomendados por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC, en su Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción (2013) recomienda los siguientes valores de IRI para todos los tipos de carretera en función de su uso.



Tabla 7. Valores de IRI admisibles según tipo de carretera

Tipo de carretera	Rugosidad Característica Inicial del Pavimento Nuevo IRI (m/km)	Rugosidad Característica Inicial del Pavimento Nuevo IRI (m/km)	Rugosidad Característica durante el Periodo de Servicio IRI (m/km)	Observación
Autopistas: IMDA > 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada uno con 2 o más carriles	2.00	2.50	3.50	Rugosidad característica, para una confiabilidad del 98 %
Carretera Duales o Multicarril: IMDA entre 6000 o 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada uno con 2 o más carriles	2.00	2.50	3.50	Rugosidad característica, para una confiabilidad del 95 %
Carreteras de Primera Clase: IMDA entre 4000 y 2001 veh/día, de una calzada de dos carriles	2.50	3.00	4.00	Rugosidad característica, para una confiabilidad del 95 %
Carreteras de Segunda Clase: IMDA entre 2000 y 401 veh/día, de una calzada de dos carriles	2.50	3.00	4.00	Rugosidad característica, para una confiabilidad del 90 %
Carreteras de Tercera Clase: IMDA entre 7400 y 201 veh/día, de una calzada de dos carriles	3.00	3.50	4.50	Rugosidad característica, para una confiabilidad del 90 %
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: IMDA ≤ 200 veh/día, de una calzada	3.00	3.50	4.50	Rugosidad característica, para una confiabilidad del 85 %

Fuente: MTC - Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras (2013)



2.2.7. Índice Medio Diario Anual (IMDA)

2.2.7.1. Índice Medio Diario Anual (IMDA)

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) en su Manual de Diseño de Carreteras (2018), lo define como: “Representa el promedio aritmético de los volúmenes diarios para todos los días del año, previsible o existente en una sección dada de la vía. Su conocimiento da una idea cuantitativa de la importancia de la vía en la sección considerada y permite realizar los cálculos de factibilidad económica.

Los valores de IMDA para tramos específicos de carretera, proporcionan al proyectista, la información necesaria para determinar las características de diseño de la carretera, su clasificación y desarrollar los programas de mejoras y mantenimiento. Los valores vehículo/día son importantes para evaluar los programas de seguridad y medir el servicio proporcionado por el transporte en carretera” (pág. 92)

2.2.7.2. Clasificación por tipo de vehículo

Según el Manual de Inventarios Viales (2011), en la página institucional del Ministerio de Transporte y Comunicaciones - MTC estipula: “Los conteos son volumétricos, se clasifican por tipo de vehículo y se realizan durante un mínimo de 07 días durante las 24 horas de cada día en cada estación.” (p.142).

Además, sobre las ubicaciones de conteo el Manual de Inventarios Viales (2011), de la página institucional del Ministerio de Transporte y Comunicaciones - MTC en lo respecto del número de estaciones indica: “Las estaciones se establecen en tramos homogéneos de la demanda y se identifican los nodos y su naturaleza que generan estos tramos” (p.142).



Teniendo en cuenta las categorías de vehículos que son indicadas en el Reglamento Nacional de Vehículos. En los conteos vehiculares para el cálculo del Índice Medio Diario Anual (IMDA), podemos tener las siguientes categorías de vehículos.

Tabla 8. Clase y tipo de vehículos

Clase	Descripción	Tipo
Autos	Autos, Station Wagon, Panel	Ligero
Camioneta	Camioneta rural y Pick up	Ligero
Micro	Microbús	Ligero
Bus	Ómnibus 2E y 3E	Pesado
Camión ligero	Camión 2E	Pesado
Camión medio	Camión 3E	Pesado
Camión pesado	Camión 4E	Pesado
Articulado	Semi-trailer de 2S2, 2S3, 3S2, 3S3 y Tráileres de 2T2, 2T3, 3T2 y 3T3	Pesado

Fuente: Manual de Inventarios Viales - MTC (2011)

2.2.7.3. Factores de corrección estacional

La determinación de los factores estacional para la presente tesis se muestra en el siguiente cuadro obtenido de una Ficha Estándar para Carreteras Inter-Urbanas dado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, tanto para vehículos ligeros como para vehículos pesados.

Tabla 9. Factor de corrección de Vehículos Ligeros por Unidad de Peaje Promedio (2010-2016)

N°	Peaje	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total	
		Ligeros	Ligeros	Ligeros	Ligeros	Ligeros	Ligeros								
		FC	FC	FC	FC	FC	FC								
65	SAYLLA	1.0247	0.9848	1.1232	1.0935	1.0634	1.0650	0.9819	0.9125	0.9189	0.9852	0.9876	0.9300	1.0000	

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC (2017)



Tabla 10. Factor de corrección de Vehículos Pesados por Unidad de Peaje
Promedio (2010-2016)

Código	Peaje	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
		Pesados	Pesados	Pesados	Pesados	Pesados								
		FC	FC	FC	FC	FC								
65	SAYLLA	1.0655	1.0234	1.0782	1.0621	1.0384	1.0339	0.9836	0.9496	0.9489	0.9527	0.9402	0.9677	1.0000

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC (2017)

2.2.7.4. Tasa de crecimiento de vehículos ligeros y pesados

Según el Proyecto Especial de Infraestructura de Transporte Nacional – PROVIAS NACIONAL, en su marco teórico de su Estudio Definitivo (2010) indica que: Dichas tasas se pueden obtener correlacionándolas con las tasas de crecimiento de las principales actividades de la zona del proyecto y el crecimiento poblacional. Por ello utilizo variables como la población y el Producto Bruto Interno (PBI), con las siguientes relaciones:

$$r_{vp} = E_1 * r_{pob}$$

$$r_{vc} = E_2 * r_{PBI}$$

Dónde:

r_{vp} : Tasa de crecimiento anual de vehículos de pasajeros

r_{vc} : Tasa de crecimiento anual de vehículos de carga

r_{pob} : Tasa de crecimiento anual de la población del área de influencia

r_{PBI} : Tasa crecimiento anual del PBI de la región

E_1, E_2 : Elasticidades del tráfico respecto a las variables explicativas.



Se utilizará los factores de Elasticidades con valor de la unidad, pues se acercan más a la realidad.

A partir de las relaciones indicadas anteriormente podemos obtener los valores indicados de fuentes estadísticas como el Instituto Nacional de Estadística e Informática – INEI del último censo 2017, de acuerdo a los últimos censos y datos recolectados de la región.

- **Tasa de crecimiento de vehículos ligeros:** 0.3 %, (Tasa de Crecimiento Anual de Vehículos 2007-2017)
- **Tasa de crecimiento de vehículos pesados:** 4.4% (en el rubro de Transporte, Almacén, Correo y Mensajería en la región del Cusco)

2.2.7.5. Proyecciones de Tránsito

Se utilizará la proyección de los vehículos, con la expresión recomendada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones en su Manual para el Diseño de Carreteras Pavimentas de Bajo Volumen (2018):

$$T_n = T_0 * (1 + i)^{n-1}$$

Dónde:

T_n : Tránsito proyectado al año “n” en veh/día.

T_0 : Tráfico actual (año base) en veh/día.

n : Años del periodo de diseño

i : Tasa anual de crecimiento de tránsito. Definida con la dinámica de crecimiento socio-económico, normalmente entre 2 y 6 % a criterio del equipo de estudio.



2.2.7.6. Cálculo del Índice Medio Diario Anual (IMDA) a partir de un conteo semanal

Para obtener el Índice Medio Diario Anual (IMDA) a partir de Índice Medio Diario Semanal (IMDS), el cual es el número mínimo de días recomendado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$IMDA = FC * IMDS$$

Dónde:

IMDA : Índice Medio Diario Anual

FC : Factor de Corrección Estacional

IMDS : Volumen clasificado promedio de la semana

El Índice Medio Diario Semanal (IMDS) se obtendrá como el promedio diario, a partir de los formatos de clasificación vehicular en el tramo es estudio.

2.2.8. Posicionamiento Geodésico Estático y Dinámico

2.2.8.1. La forma de la tierra y las superficies de referencia

El Instituto Geográfico Nacional – IGN en las Especificaciones técnicas para posicionamiento geodésico estático relativo con receptores del sistema satelital de navegación total (2015), refiere que superficie de la tierra es muy compleja, por lo que, en la rama de la Geodesia, establece aproximadamente que la forma de la tierra puede ser descrita por un elipsoide, esto se debe a que la forma de la tierra responde a fórmulas analíticas, de manera que permite hacer cálculos apoyándose en él. A continuación, se muestra una figura en donde se puede apreciar, que la figura que más representa la superficie



de la Tierra es la Geoide, el cual se define como la superficie equipotencial del campo gravitatorio de la Tierra.

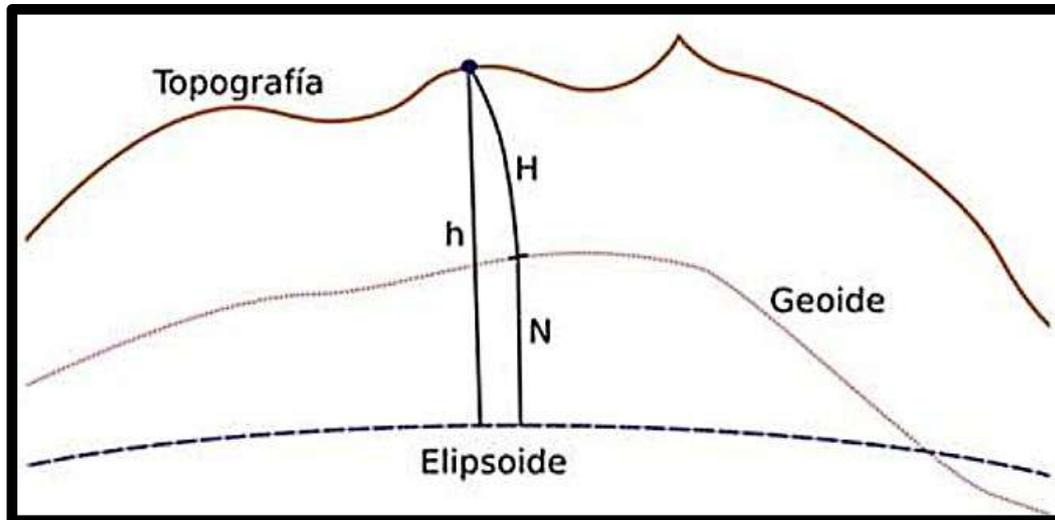


Figura 16. Las tres superficies de la Tierra. Fuente Instituto Geográfico Nacional – IGN (2015)

2.2.8.2. Procedimiento de toma de datos geodésicos

El Instituto Geográfico Nacional – IGN en su Manual de especificaciones técnicas para posicionamiento (2014), afirma: “Actualmente, los diferentes proyectos en la planeación y desarrollo de las actividades humanas requieren de su ubicación espacial, la cual está dada por la localización geográfica. Dicha localización se expresa mediante coordenadas geográficas (Latitud, Longitud) o planas (Norte, Este), las cuales son la base de todos los sistemas de información geográfica” (p. 28).

Por lo tanto, debemos primero tener en cuenta la precisión de los equipos a utilizar en función de los trabajos de ingeniería que se desea realizar, a continuación, una tabla que nos permite obtener tales requisitos de precisión, estos son recomendados por la Directrices para el uso de GNSS en topografía y cartografía.



Tabla 11. Medición en métodos topográficos para aplicaciones en trabajos de diversas magnitudes de importancia

Método de medición	Aplicación típica recomendada	Precisión, longitud de línea base y tiempo de ocupación sugerido
Alta precisión ESTÁTICO (5-10 mm)	<p>Redes nacionales/internacionales y medida de Marco de Referencia</p> <p>Mediciones Geodésicas para establecer parámetros de transformación</p> <p>Monitoreo de Tectónica de Placas</p> <p>Levantamiento Topográfico, medidas de control de orden alto.</p> <p>Fotogrametría, Control terrestre de orden alto</p> <p>Sensor remoto, Control terrestre de orden alto</p> <p>Estudios de deformación, nivel de mar y monitoreo de mareas</p> <p>Estudios de monitoreos atmosféricos</p>	<p>Receptores de Doble-Frecuencia</p> <p>H 5mm + 1 ppm</p> <p>V 10 mm + 1ppm</p> <p>Línea Base:</p> <p>20 km por al menos 1 hora</p> <p>30 km por al menos 2 horas</p> <p>50 km por al menos 4 horas</p> <p>100 km por al menos 6 horas</p>
Precisión Media ESTÁTICO (10-60 mm)	<p>Levantamientos topográficos, Medidas de control de orden bajo</p> <p>Ingeniería civil, Estaciones de control de orden bajo</p> <p>Fotogrametría, Punto de control de fotos.</p>	<p>Receptores de Doble-frecuencia</p> <p>H 10 mm + 1ppm</p> <p>V 20 mm + 1ppm</p> <p>Línea base:</p> <p>20 km por 20 minutos</p> <p>30 km por 40 minutos</p> <p>40 km por 60 minutos</p> <p>(redes RTK usando observaciones</p>

Continúa...



Método de medición	Aplicación típica recomendada	Precisión, longitud de línea base y tiempo de ocupación sugerido
	Perfiles topográficos de orden alto Levantamiento topográfico, detalle y posicionamiento de orden alto.	de por lo menos 2 sets de 3 minutos separado de por lo menos 20 minutos para poder dar H=10-20 mm y V=15-30mm)

Fuente: Directrices para el uso de GNSS en topografía y cartografía. (recuperado del Informe de PROVIAS NACIONAL, 2014)

2.2.9. Evaluación funcional utilizando de Método de Nivel Estático de un pavimento

2.2.9.1. Identificación del ahuellamiento o rodera para el perfil longitudinal en un carril

Para el Índice de Rugosidad Internacional – IRI, el modelo de cuarto de coche establece que sólo se debe de considerar un perfil longitudinal del carril, este debe de ser el más representativo. Si se realiza la medición de los dos ahuellamientos de las llantas del automóvil, la prueba pasaría a considerarse IRI – Medio Coche. La norma Prácticas estándar para simular la respuesta a perfiles longitudinales de superficies transitadas E 1170 – 97 de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales – ASTM, establece el fundamento matemático y las soluciones a las ecuaciones diferenciales ordinarias por el método de la ecuación de estado, que son necesarias para resolver tales sistemas de masas y resortes.

Según Sologorre Huayta (Tesis de Pregrado, 2005), indica el procedimiento para la identificación de los ahuellamientos o roderas en el carril del pavimento:

- i. El área donde se va realizar la toma de datos debe de estar limpia, para evitar lecturas no representativas.



- ii. Se debe de marcar con tiza o material análogo la huella de rodadura, la cual, debe de estar ubicada a 0.70 o 0.80 cm del centro del carril. El centro del carril debe de ubicarse según las siguientes pautas:
- CASO I: Donde se ubican o identifican las huellas de rodadura, el centro del carril se toma como la mitad del espaciamiento entre dichas huellas.
 - CASO II: Si las huellas no son identificables, pero se nota los bordes del camino, el centro del carril se toma como la mitad de la distancia entre los bordes, esto es en calzadas de un solo carril. Similar deducción se realiza si la calzada presenta más de dos carriles.
 - CASO III: Donde las huellas de rodaduras no se identifican claramente, pero se nota un borde del camino; El centro del carril debe de establecerse a 1.50 cm del borde identificado. Otra alternativa es ubicarlo en la mitad del ancho aproximado del carril. Esto generalmente ocurre en pavimentos afirmados. (pág. 107,108)

2.2.9.2. Procedimiento general por el método de nivel estático

El nivel y mira son llamados estáticos porque los instrumentos no se están moviendo cuando las medidas de elevación son tomadas. La norma que se constituye como una guía para medir perfiles con éste método estático es Método de prueba estándar para medir la rugosidad de la carretera mediante el método de nivel estático, E 1364 – 95(2005). Éste método indica los instrumentos que requieren, los cuidados en la precisión e incertidumbre en los instrumentos, el procedimiento de toma de datos, los errores que pueden ser introducidos en la aplicación de la prueba y finalmente el análisis de los datos con un algoritmo, para su posterior determinación del parámetro



Índice de Rugosidad Internacional (IRI). Se adjunta la norma en el anexo de la presente investigación.

2.2.9.2.1. Equipos necesarios

- Cinta métrica: con una precisión del 2% de la longitud total.
- Nivel: Con una precisión de acuerdo a la clase a la que pertenecería según ésta norma en función del IRI probable a obtener, indicado en el siguiente cuadro:

Tabla 12. Clasificación de la medición en función Precisiones o resoluciones de los equipos

Rango de Rugosidad IRI In./mile (m/km)	Resolución Requerida in.(mm)	
	Clase 1	Clase 2
0 (0) ≤ IRI ≤ 30 (0.5)	0.005 (0.125)	0.01 (0.25)
30 (.5) ≤ IRI ≤ 63 (1)	0.01 (0.25)	0.02 (0.5)
63 (1) ≤ IRI ≤ 190 (3)	0.02 (0.5)	0.04 (1.0)
190 (3) ≤ IRI ≤ 317 (5)	0.04 (1.0)	0.08 (2.0)
317 (5) ≤ IRI ≤ 444 (7)	0.06 (1.5)	0.12 (3.0)
444 (7) ≤ IRI	0.08 (2.0)	0.16 (4.0)

Fuente: Método de prueba estándar para medir la rugosidad de la carretera mediante el método de nivel estático, E 1364 – 95(2005)

- Mira o estadal: Mejora la medición si esta sobre una base punteada con un contacto no mayor a 20 mm.
- Computadora
- Grabadora de datos
- Pintura, tiza, cinta masking tape

2.2.9.2.2. Procedimiento de la prueba

- Para hallar la línea de rodera o de ahuellamiento en superficie del pavimento, según Sologorre Huayta (Tesis de Pregrado, 2005) indica: “Muchas veces, determinar la ubicación a simple vista, de la huella de



rodadura sobre el carril en estudio no es tan fácil como parece, si pensamos que debemos de ser exactos, pero lo que se quiere con esto es obtener una mayor representatividad de los valores obtenidos en el cálculo del IRI. (...). A continuación, se dan las pautas de cómo deben de marcarse las huellas en el carril, usando el procedimiento siguiente:

1. El área debe de ser limpiada en ambas huellas de la rueda, libre de tierra o piedras y elementos sueltos, para prevenir durante las medidas.
2. Use la línea de tiza para marcar la línea recta en cada huella de rodadura que debe de ser a 0.70 o 0.80 m, según sea el caso, del centro del carril. El centro del carril que se usa según estas pautas debe de localizarse de la siguiente manera:
 - Caso I: Donde se identifican las huellas de la rueda fácilmente, a la mitad del sendero entre las dos huellas de la rueda, debe de usarse como el centro del carril.
 - Caso II: Si las huellas de la rueda no son claramente identificables, pero se definen bien dos bordes del camino, se considera que el centro es la mitad del camino entre los bordes de la senda, en calzadas de un solo carril, una deducción similar se realiza para calzada de dos carriles o más.
 - Caso III: Donde las huellas de la rueda no están claras y solo un borde de la senda puede distinguirse claramente el centro del



carril debe de establecerse a 1.50 m de ese borde, otra alternativa en este caso es considerar que el centro es la mitad del ancho estimado del carril, este caso generalmente ocurre en pavimentos afirmados.

Las medidas tienen que ser tomadas a lo largo de las huellas de la rueda a intervalos definidos que pueden ser 0.25 m a 0.50 m” (p. 106,107,108).

- Los intervalos de prueba que son necesarios para realizar las mediciones no deben de exceder a 50 pies (15 metros).

Los intervalos de lectura en el perfil longitudinal identificado, se tomarán de acuerdo a la clase de medición que se está efectuando: no deben de exceder de 1 pie (305 mm) para mediciones clase 1, y 2 pies (610 mm) para mediciones clase 2.

Se debe de realizar puntos de cambio adecuados considerando las últimas lecturas para no introducir errores que tengan significancia en las mediciones del perfil.

- La norma Método de prueba estándar para medir la rugosidad de la carretera mediante el método de nivel estático, E 1364 – 95(2005), en su acápite 7.2, con respecto a los errores que se pueden introducir en el trabajo de campo indica sobre el Registro de datos y entrada: “La fuente que es más difícil de eliminar esta en el registro de las mediciones de nivel. Un perfil medido típico involucra al menos 265 lecturas individuales (1/10 de milla, mediciones de Clase 2), y posiblemente miles. Estos deben de ser escritos en



las notas de campo y después introducidos en una computadora. Un número que tiene un error grave tiene el mismo efecto en el cálculo de rugosidad como un gran incremento en el perfil. Por lo tanto, el equipo topográfico debe de ser consciente de este hecho” (p. 3).

2.2.9.2.3. Errores comunes en la prueba

- **Entrada y grabación de datos:** Debido a la gran cantidad de datos que se obtienen en el perfil, pues en una distancia de 1/10 de milla con mediciones Clase 2, involucra al menos 265 lecturas individuales, estos deben de ser estos deben de ser adecuadamente registrados e introducidos en la computadora.
- **Posicionamiento inadecuado del nivel:** El instrumento de nivelado debe de descansar sobre un verdadero nivel horizontal, y no debe de ser movido durante las lecturas.
- **Desviación de la mira de la verdadera vertical:** Conocemos que la altura de la marca de la mira en un punto del pavimento es $h=r \cdot \cos\alpha$ donde:
R=Lectura (distancia del punto de apoyo en el pavimento hasta una marca conocida).
 α =Desviación angular de la mira del verdadero vertical.
h= Verdadera altura del punto donde se realizan las lecturas.
Este error puede ser muy grosero si no se controla al momento de tomar las medidas, con una burbuja de nivel.



- **Error de elevación absoluto:** Este factor no contribuye en el parámetro de rugosidad. Pues se pueden tomar incluso con altitudes relativas o referenciales.

- **Error acumulativo:** El análisis del IRI aplicado al perfil hace énfasis a los cambios de elevación que ocurren dentro de la unidad de muestra de 50 pies (15 m). Cambios de elevación acumulados sobre 200 pies (61 m), típicamente contribuye en un 0.2 % al valor del IRI. Por lo tanto, éste error de acumulación no es generalmente un factor importante cuando se realiza un análisis del IRI. Para validar equipos inerciales, este error requiere un control más estricto.

2.2.9.2.4. Validación de perfilómetros

Si el ensayo de cálculo del IRI con nivel y mira es utilizado para validar equipos perfilométricos, como por ejemplo Perfilómetros Inerciales o Sistemas Tipo Respuesta, se debe de seguir el mismo proceso de análisis usado para obtener perfiles con Nivel y Mira.

2.2.9.2.5. Programa de cálculo del IRI

En la norma Método de prueba estándar para medir la rugosidad de la carretera mediante el método de nivel estático, E 1364 – 95(2005), muestra un programa en BASIC, el cual es adaptado del Paper N° 46 del Banco Mundial, éste programa calcula el IRI cuando los puntos del perfil están espaciados a 1 pie. Para hacer el programa para uso rutinario, se debe de modificar las Líneas 1160,1170,1270 y



1290 en el programa, dependiendo de las clases de medición que se realice.

```
1000 REM This program demonstrates the IRI computation. It is
1010 REM described in pp. 31 - 43 of World Bank Technical Paper #46.
1020 REM The sample interval is 1.0 ft. IRI output has units of
1021 REM elevation / ft.
1030 REM ----- Initialize constants
1040 DIM Y(26),Z(4),Z1(4),ST(4,4),PR(4)
1050 READ DX
1060 K = INT (1. / DX + .5) + 1
1070 IF K < 2 THEN K = 2
1080 BL = (K - 1) * DX
1090 FOR I = 1 TO 4
1100 FOR J = 1 TO 4
1110 READ ST(I,J)
1120 NEXT J
1130 READ PR(I)
1140 NEXT I
1150 REM ----- Initialize variables.
1160 INPUT "profile elevation 36 ft from start:", Y(K)
1170 INPUT "X = 0. Elevation = ",Y(1)
1180 Z1(1) = (Y(K) - Y(1)) / 36.
1190 Z1(2) = 0
1200 Z1(3) = Z1(1)
1210 Z1(4) = 0
1220 RS = 0
1230 IX = 1
1240 I = 0
1250 REM ----- Loop to input profile and Calculate Roughness
1260 I = I + 1
1270 PRINT "X = ";IX * DX,
1280 IX = IX + 1
1290 INPUT "Elev. = "; Y(K)
1300 REM ----- Compute slope input
1310 IF IX < K THEN Y(IX) = Y(K)
1320 IF IX < K THEN GOTO 1270
1330 YP = (Y(K) - Y(1)) / BL
1340 FOR J = 2 TO K
1350 Y(J-1) = Y(J)
1360 NEXT J
1370 REM ----- Simulate vehicle response
1380 FOR J = 1 TO 4
1390 Z(J) = PR(J) * YP
1400 FOR JJ = 1 TO 4
1410 Z(J) = Z(J) + ST(J,JJ) * Z1(JJ)
1420 NEXT JJ
1430 NEXT J
1440 FOR J = 1 TO 4
1450 Z1(J) = Z(J)
1460 NEXT J
1470 RS = RS + ABS (Z(1) - Z(3))
1480 PRINT "disp = ";RS * DX, "IRI = ";RS / I
1490 GOTO 1260
1500 END
1510 DATA 1.
1520 DATA .9951219, 1.323022E-02, -4.721649E-03, 4.516408E-04, 9.599989E-03
1530 DATA -.6468806, .9338062, -1.319262, 5.659404E-02, 1.966143
1540 DATA 3.018876E-02, 3.010939E-03, .6487856, 9.129263E-03, .3210257
1550 DATA 3.661957, .3772937, -43.40468, .3016807, 39.74273
```

Figura 17. Ejemplo de programa BASIC. Fuente: Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method, E 1364 – 95(2005)



Para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional – IRI, en la presente investigación se utilizará un software PROVAL 3.61.30, el cual puede ser descargado de la página web www.roadprofile.com THE TRANSTEC GROUP de U.S. Departamento de Transportes y Administración de Carreteras Federales.



Figura 18. Software PROVAL 3.61.30. Fuente: U.S. Department of Transportation

También se debe tener en cuenta la norma emitida por la Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras y Transportes del Estado – AASTHO (2004) designation:PP 37-04, el cual, indica la significancia y uso del parámetro del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), las normas que se requieren para el cálculo de éste parámetro, el cálculo y el reporte una vez culminado el ensayo o trabajo en campo. También, se adjunta en el anexo de la presente investigación.



2.2.9.2.6. Elaboración del archivo ERD para el software ProVAL.

Una guía en la elaboración de un archivo en formato ERD está dada por la Instituto de Investigación en Transporte de la Universidad de Michigan – UMTRI, en el año 1997 con el nombre, Formato de archivo ERD para almacenamiento y análisis de perfiles de carreteras.

Según Montoya Goicochea (Tesis de maestría, 2013): “El archivo ERD es un formato de archivo estándar que se utiliza para almacenar números en forma de tabla, con las etiquetas de asistencia técnica automatizada de trazado y procesamiento. Un archivo contiene dos secciones independientes: la cabecera y los datos. La parte del encabezado contiene sólo texto y la parte de los datos contiene sólo números” (pág. 52).

Las cotas deben de ser multiplicadas por 1000 y los decimales deben de ser formateados con 5 decimales.

A continuación, en el siguiente cuadro se muestra una adaptación de las 10 primeras cotas al formato ERD, el total consolidado se adjunta en el disco compacto adjuntado a los Anexos.

Posteriormente estos datos se deben de colocar, haciendo uso del block de notas como se muestra en la siguiente imagen:



```
KM 158 - KM 165 CD-HE: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
ERDFILEV2.00
1, 4001, 4001, 1, 5, 0.25000, -1.
TITLE SECTOR 3.2
SHORTNAMElev.
UNITSNAME
XLABEL Distance
XUNITS m
DATE wed, 04 Ago 2009 at 08:05
PROFINSTSSI Inertial Profiler
HIGHPASSNone
LOWPASS None
ANMLYFLTtrue
OPERATOREnsayo
PROJID 001
COUNTY sector3
STATE PE
WEATHER Huella externa
SECNOTESHuella externa
END
3201815.00000
3201823.00000
3201830.00000
3201838.00000
3201846.00000
3201854.00000
3201861.00000
3201869.00000
3201877.00000
3201884.00000
3201892.00000
3201900.00000
3201908.00000
3201915.00000
3201923.00000
3201931.00000
3201938.00000
3201946.00000
3201953.00000
```

Figura 19. Visualización del archivo ERD haciendo uso de programa block de notas. Fuente: Montoya Goicochea (Tesis de Maestría,2013)

2.2.10. Aspectos técnicos del proceso de nivelación

El proceso de la obtención del perfil topográfico con el nivel y mira, debe seguir conceptos de topografía, ampliamente usados en obras de ingeniería por ingenieros.

2.2.10.1. Nivelación Geométrica

Según Casanova Matera (2002) indica “(...) es el procedimiento topográfico que nos permite determinar el desnivel entre dos puntos mediante el uso del nivel y la mira vertical. La nivelación geométrica mide la diferencia de nivel entre dos puntos a partir de la visual horizontal lanzada desde el nivel hacia las miras colocadas en dichos puntos (...)” (pág. 180).

Casanova Matera (2002), clasifica dos tipos de nivelaciones con el nivel y la mira:

- **Nivelación geométrica simple:** Los puntos topográficos se encuentran dentro del campo topográfico altimétrico y el desnivel entre dichos

puntos se pueden medir con una sola estación, a su vez, esta se clasifica en:

- Nivelación simple desde el extremo

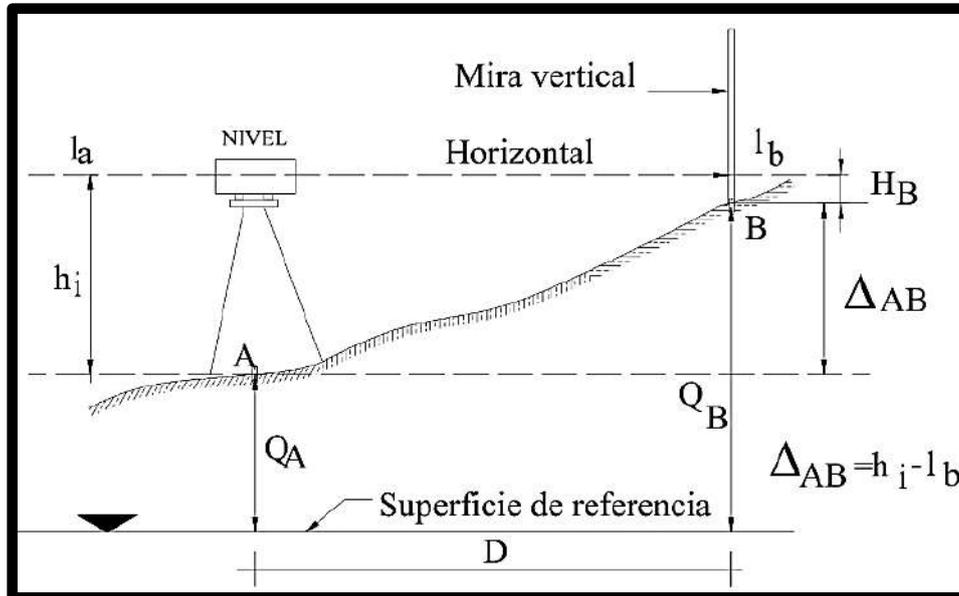


Figura 20. Nivelación simple desde el extremo. Fuente: Casanova Matera (2002, pág. 181)

- Nivelación simple desde el medio

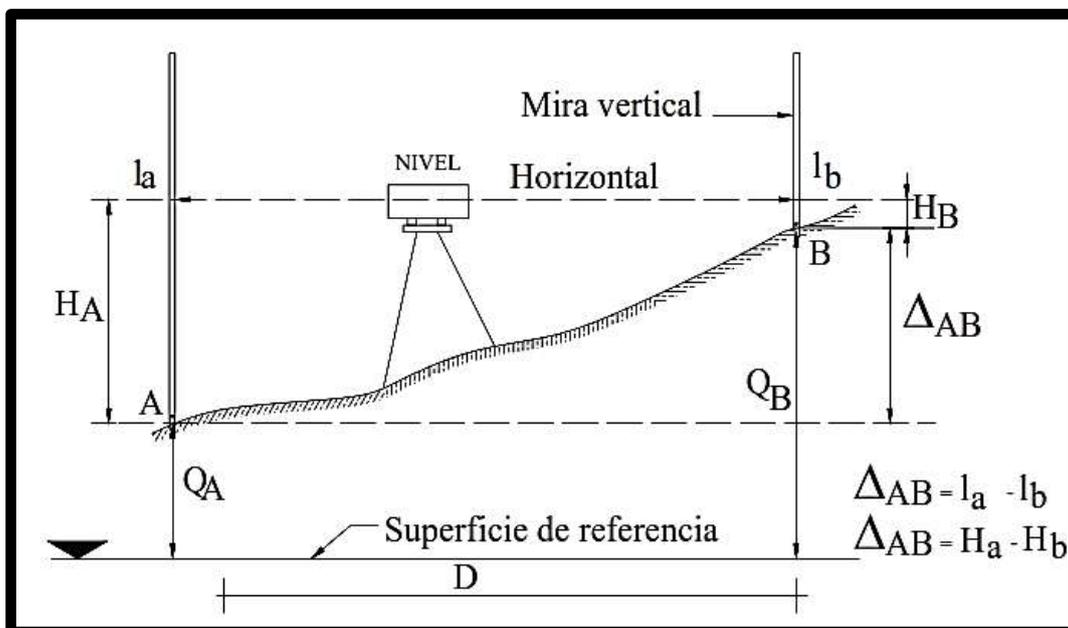


Figura 21. Nivelación simple desde el medio. Fuente: Casanova Matera (2002, pág. 181)



- **Nivelación geométrica compuesta:** Consiste en una nivelación geométrica donde el tramo a nivelar es largo y no se puede medir con una estación, por ello es requerido estaciones de cambio. En este tipo de medición es recomendable utilizar sucesivamente la nivelación geométrica desde el medio.

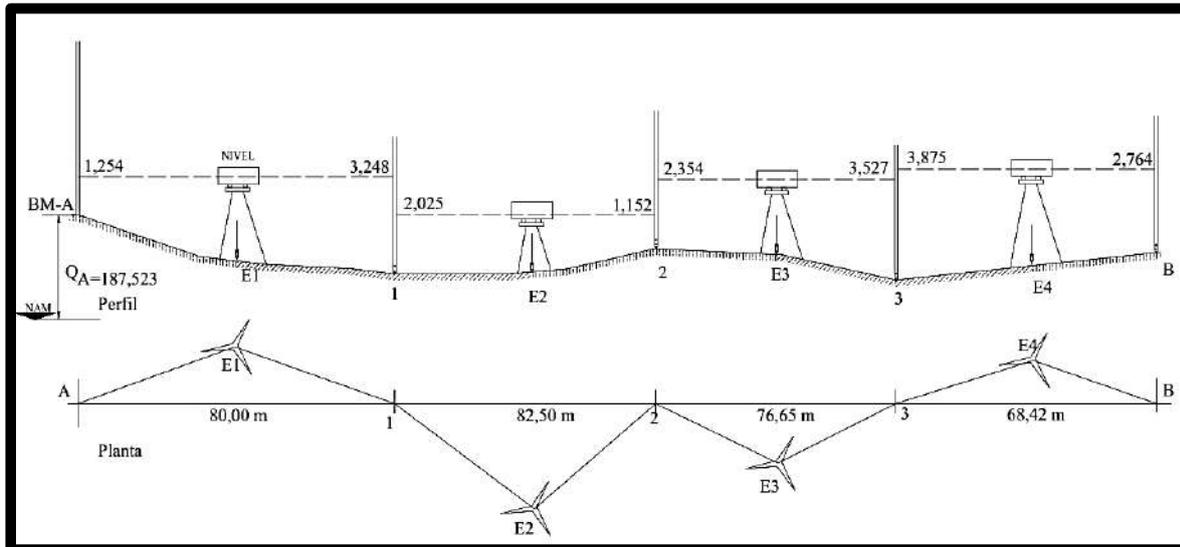


Figura 22. Nivelación geométrica compuesta desde el medio. Fuente: Casanova Matera (2002, pág. 181)

2.2.10.2. Nivelación de perfiles

En la mayoría de proyectos hidráulicos, canales, acueductos, carreteras, etc. Se requiere realizar nivelación de perfiles longitudinales.

En la presente investigación se realizará el cálculo de las cotas del terreno en la nivelación, por el método del horizonte, el cual, consiste en hallar el eje de colimación relativa entre cada estación. Las cotas del terreno se hallan simplemente mediante una diferencia entre el eje de colimación y las lecturas de los puntos intermedios con la mira.



2.2.10.3. Control de los errores en el proceso de nivelación

En la presente investigación es necesario controlar los errores, los cuales son propios de los instrumentos y del procedimiento de toma de las mediciones. En topografía es posible controlar los errores de proceso de medición del perfil. Casanova Matera (2002) indica que se puede lograr minimizar estos errores con una nivelación cerrada (ida y vuelta) o una nivelación de enlace con puntos de control (BM), al inicio y fin de la nivelación. En la nivelación cerrada el punto de partida debe de coincidir con el punto de llegada. Debe de existir una tolerancia en el error de cierre que a continuación se muestra:

$$T_n = m\sqrt{k}$$

- T_n es la tolerancia para el error de cierre
- m depende de los instrumentos, método y nivelación requerida, para nivelaciones de tercer orden se recomienda un valor de 12 a 15 mm.
- k es la longitud total de nivelación en km.

Las compensaciones que se deben de realizar del error de cierre, pueden ser de dos formas:

2.2.10.3.1. Compensación proporcional a la distancia nivelada

Esta compensación se distribuye el error de forma proporcional a la distancia de nivelación. En este método se asume que los errores son generados se cometen en las lecturas adelante y atrás

2.2.10.3.2. Compensación sobre los puntos de cambio

Éste método es mucho más sencillo, pues el error se distribuye sólo en los puntos de cambio. Por lo tanto, la corrección será $C = -E_n/N$. Donde N es el número de estaciones de cambio.



A continuación, se da un modelo de compensación de cotas por los dos métodos.

Datos de campo							Método proporcional				Método de los puntos de cambio		
Est	PV	Dist. P.	Dist. Ac.	L _{AT}	L _{INT}	L _{AD}	Horiz	Cotas Calc.	Corr.	Cotas comp.	Corr.	Horiz.	Cotas
E1	A	0,00	0,00	2,125			285,837	283,712		283,712		285,837	283,712
	1	120,00	120,00			1,476		284,361	-0,002	284,359	-0,004		284,357
E2	1			0,520			284,881	284,361	-0,002	284,359		284,877	284,357
	2	60,00	180,00		1,563			283,318	-0,002	283,316			283,314
	3	42,00	222,00		2,042			282,839	-0,002	282,837			282,835
	4	65,00	287,00			2,953		281,928	-0,004	281,924	-0,004		281,920
E3	4	--	--	3,162			285,090	281,928	-0,004	281,924		285,082	281,920
	5	80,00	367,00		2,850			282,240	-0,004	282,236			282,232
	6	95,00	462,00		1,644			283,446	-0,004	283,442			283,438
	7	98,00	560,00			0,761		284,329	-0,007	284,322	-0,004		284,317
E4	7	--	--	1,746			286,075	284,329	-0,007	284,322		286,063	284,317
	8	100,00	660,00		0,879			285,196	-0,007	285,189			285,184
	9	120,00	780,00		1,463			284,612	-0,007	284,605			284,600
	B	120,00	900,00			2,432		283,643	-0,012	283,631			283,631
				Σ	7,553		7,622	Q _B	283,631		Σ	-0,012	
				Dif.	-0,069			Dif.	+0,012				

Figura 23. Método proporcional y puntos de cambio. Fuente: Casanova Matera (2002)

2.2.11. Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)

El concepto calidad de un pavimento tiene dificultades conceptuales, pues depende del fin de la evaluación, si es de tipo funcional o estructural. Carey e Irick (citado en Sologorre Huayta, Tesis de Pregrado, 2005), en el año de 1959, para el Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras y Transportes del Estado – AASHO, supusieron las siguientes premisas:

- El pavimento debe de proporcionar confort y seguridad al usuario.
- El confort y la calidad de rodado es un aspecto subjetivo o de opinión del usuario.
- La serviciabilidad puede determinarse a partir del promedio de las evaluaciones de todos los usuarios. Este promedio da origen al índice Calificación actual de capacidad de servicio (PSR), el cual es por naturaleza de carácter subjetivo.
- Hay algunas características físicas del pavimento que pueden medirse objetivamente y pueden relacionarse con las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento permite obtener un el Índice de Serviciabilidad Presente(PSI).



- El comportamiento del pavimento puede ser presentado por la serviciabilidad del pavimento.

Las anteriores suposiciones actualmente siguen vigentes, como, por ejemplo, el Calificación actual de capacidad de servicio (PSR) por tener carácter subjetivo, ha sido desplazado en por el Índice de Serviciabilidad Presente(PSI) es cual es relacionable de manera objetiva con el estado del pavimento, cuya escala se muestra a continuación:

Tabla 13. Escala de calificación de la serviciabilidad

CALIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN
Numérica	Verbal	
[0 – 1]	Muy malo	Los pavimentos en esta categoría se encuentran en una situación de extremo deterioro. Los caminos se pueden pasar a velocidades reducidas y con considerables problemas de transitabilidad. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75% o más de la superficie.
[1 – 2]	Malo	Los pavimentos en esta categoría se han deteriorado hasta un punto donde pueden afectar la velocidad de tránsito de flujo libre. Los pavimentos flexibles pueden tener grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye pérdida de áridos, agrietamiento y ahuellamiento y ocurre en un 50% o más de la superficie. El deterioro en pavimentos rígidos incluye desconche de juntas, escalonamiento, parches, agrietamiento y bombeo.
[2 – 3]	Regular	En esta categoría la calidad de manejo es notablemente inferior a la de los pavimentos nuevos y puede presentar problemas para altas velocidades de tránsito, se hace más notorio la presencia del deterioro superficial. Los defectos superficiales en pavimentos flexibles pueden incluir ahuellamientos, parches y agrietamientos. Los

Continúa...



CALIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN
Numérica	Verbal	
		pavimentos rígidos en este grupo pueden presentar fallas en las juntas, agrietamiento y escalonamiento.
[3 – 4]	Bueno	Los pavimentos de esta categoría muestran una transitabilidad confortable, con muy poco o ningún signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden estar comenzando a mostrar signos de ahuellamiento y figuración aleatoria. Los pavimentos rígidos pueden estar empezando a mostrar evidencias de un leve deterioro superficial, como desconches y fisuras menores.
[4 – 5]	Muy Bueno	Sólo los pavimentos nuevos (o casi nuevos) son lo suficientemente confortables y sin deterioro para clasificar en esta categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos o rehabilitados durante el año de inspección normalmente obtendrían esta calificación.

Fuente: Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras Estatales–AASHO (Adaptado de Sologorre Huayta, Tesis de Pregrado, 2005)

En ingeniería civil, en el diseño de pavimentos generalmente un concepto que está relacionado con la estructura en sí, es el nivel de serviciabilidad del pavimento, el cual, en el tiempo va cambiando a medida que aparecen fallas en la superficie y en la estructura.

Según la Huamán Gerrero (1997) en su Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimentos, indica que el nivel de serviciabilidad se define como: “El índice de Serviciabilidad Presente (ΔIPS) tiene en cuenta el comportamiento del pavimento y queda definido por una calificación del 1 al 5. Para pavimentos flexibles se parte de un valor inicial de $P_o=4.2$ y se determina el valor donde ocurre la falla funcional del pavimento $P_t=2.2$, es decir



que la pérdida del índice de serviciabilidad es de $\Delta IPS=4.2-2.2=2.0$. (...)” (pág. 80).

A continuación, se muestran los valores de serviciabilidad iniciales y finales que recomienda a AASHTO.

Tabla 14. Serviciabilidad inicial, Po

Tipo de pavimento	Serviciabilidad inicial, Po
Concreto	4.5
Asfalto	4.2

Fuente: AASHTO Guía para el diseño de la estructura del pavimento. Washington D.C. 1993. P. II-10 (obtenido de Huaman Guerrero, 1997)

Tabla 15. Serviciabilidad final, Pt

Tipo de vía	Serviciabilidad final, Pt
Autopista	2.5 – 3.0
Carreteras	2.0 – 2.5
Zonas industriales	
Pavimento urbano principal	1.5 – 2.0
Pavimento urbano secundario	1.5 – 2.0

Fuente: AASHTO Guía para el diseño de la estructura del pavimento. Washington D.C. 1993. P. II-10 (obtenido de Huaman Guerrero, 1997)

Para cualificar tramos o en toda su longitud una vía se debe de hallar los valores respectivamente y ubicarlos en una escala del Índice de Serviciabilidad Presente– PSI, existen múltiples correlaciones con la medida de diversos métodos objetivos en el pavimento, generalmente en evaluaciones a nivel funcional o en la superficie del pavimento. Para la investigación presente, se



debe de utilizar una correlación con el Índice de Rugosidad Internacional – IRI.

Según M. W. Sayers (Citado en Sologorre Huayta, Tesis de pregrado, 2005), establece una relación del Índice de Serviciabilidad Presente– PSI con el International Roughness Index (IRI), la cual fue obtenida durante el experimento Internacional de Rugosidad de Caminos (IRRE) realizado en Brasil en 1982, el cual tiene la siguiente expresión:

$$PSI = \frac{5.0}{e^{\frac{IRI}{5.5}}} \pm 25\%$$

La anterior expresión es válida para valores de IRI menores a 12. Los valores del Índice de Serviciabilidad Presente– PSI. La ecuación anterior debe de ser utilizada conjuntamente con la siguiente tabla:

Tabla 16. Calificación de la Serviciabilidad o Transitabilidad

PSI	Transitabilidad
0 – 1	Muy malo
1 – 2	Malo
2 – 3	Regular
3 – 4	Bueno
4 – 5	Muy Bueno

Fuente: Experimento internacional de rugosidad vial – IRRE (1982)

A continuación, se muestra un cuadro de correlación el Índice de Serviciabilidad - PSI y el Índice de Rugosidad IRI, con los rangos de valores que pueden tomar.



Tabla 17. Rangos y valores característicos de IRI en función del PSI

Pavimento Flexible - Modelo (AASHO)			Pavimento Rígido - Modelo (AASHO)			Clasificación	Descripción AASHO
Valores de PSI	Valores de IRI	Rangos de IRI	Valores de PSI	Valores de IRI	Rangos de IRI		
5.0	0.0	0-1.0	5.0	0.0	0-1.4	Muy Buena	Sólo los pavimentos nuevos (o casi nuevos) son los suficientemente suaves y sin deterioro para clasificar en esta categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos o recapeados durante el año de inspección, normalmente se clasificará como buenos.
4.2	0.8		4.5	0.97			
4.0	1.0		4.0	1.4			
3.0	1.9	1.0-1.9	3.0	2.3	1.4-2.3	Buena	Los pavimentos de esta categoría si bien no son tan buenos como los de "Muy Buenos", entregan un manejo de primera clase o muestran muy poco o ningún signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden estar empezando a mostrar evidencias de un leve deterioro superficial, como desprendimientos o fisuras menores.
2.5	2.6	1.9-3.6	2.5	2.9	1.3-3.6	Regular	En esta categoría la calidad de manejo es notablemente inferior a los pavimentos nuevos y pueden presentar problemas para altas velocidades de tránsito. Los defectos superficiales pueden incluir ahuellamiento, parches, agrietamiento. Los pavimentos rígidos en este grupo pueden presentar fallas en la junta, agrietamiento, escalonamiento y bombeo de finos
2.0	3.6		2.0	3.6			
1.5	4.9	3.6-6.4	1.5	4.6	3.6-6	Mala	Los pavimentos den esta categoría se han deteriorado hasta un punto donde puede afectar la velocidad de tránsito de flujo libre. Los pavimentos libres pueden tener grande baches y grietas profundas; el deterioro incluye pérdida de áridos, agrietamientos, ahuellamiento y ocurre en un 50% o más de la superficie. El deterioro en pavimentos rígidos incluye desconche de juntas, escalonamientos, parches, agrietamiento y bombeo
1.0	6.4		1.0	6.0			
0.0	9.5	Mayor a 6.4	0.0	11.2	Mayor a 6	Muy Mala	Los pavimentos en esta categoría se encuentran en una situación de extremo deterioro. Los caminos pueden pasar a velocidades reducidas y considerables problemas de manejo. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75%o más de la superficie.

Fuente: Barrantes Jimenez, 2011 (Obtenido de Laura Hirpahuanca, Tesis de Pregrado, 2016)



2.2.12. Notas sobre el intervalo empleado en el perfil

En el presente trabajo de investigación, dentro de la clasificación del método de levantamiento topográfico con Mira y Nivel topográfico se utilizó un intervalo en el perfil de 0.5 metros. Según Sologorre Huayta (2005): “La estadística del IRI está basada en las longitudes de onda de 1.3 – 30 m (Sayers,1986). Así, que basado en Intervalo de Nysquit el cual es $I_{max} < 0.5\lambda$, el intervalo de muestra máximo para caracterizar el IRI es de 0.65 m. Sin embargo, en la definición de las normas para perfilar, Sayers (1986), recomienda un menor rango para el intervalo de muestra, de 0.25 m a 0.50 m” (pág.102). Podemos apreciar que nuestro intervalo de 0.50 utilizado en la presente prueba está dentro del rango establecido.

Además, según Arriga Patiño, Garnica Anguas y Rico Rodriguez (1998) indican que: “EL programa calcula el valor del Índice Internacional de Rugosidad, a partir del perfil del camino realizado por un levantamiento topográfico de una rodada, para un intervalo de muestra (dx) seleccionado, que se encuentra entre 0.10 y 0.60 m, siendo las más comunes para el cálculo las de 0.25 y 0.50 m para una longitud de tramo de estudio no mayor de 600 m. La elección entre 0.25 y 0.50 m es debido a que el Banco Mundial indica que con la primera se tiene mejor precisión de las deformaciones en el pavimento, sin embargo, se ha observado que no existe diferencia significativa en el resultado del IRI con respecto a utilizar $dx = 0.50$, no así el trabajo del levantamiento y el manejo de datos, por lo que es mejor trabajar con el intervalo de cincuenta centímetros” (pág. 22).

2.2.13. Estimación del porcentaje de vida remanente útil de un pavimento a partir de un modelo de distribución Weibull

Para la utilización del modelo de Weibull en la estimación de la vida remanente en el pavimento flexible, debemos que dar algunas notas sobre el intervalo en el perfil longitudinal en la prueba de evaluación funcional con el nivel topográfico y la mira.



Según Sánchez S. y de Solminihac T. (1989), indica sobre el que: “(...). Entre los sistemas estáticos algunos dan perfiles de precisión como los métodos de "mira y nivel" (o topográficos) los de "Viga y nivel", el Dipstick, etc. (...). Los sistemas estáticos de precisión consiguen las medidas más exactas del perfil longitudinal. Sin embargo, su bajo rendimiento y alto costo los hace inadecuados para estudios que no sean muy especiales, como los de investigación, o en países donde la mano de obra sea muy barata. (...)” (pág. 2), por lo el levantamiento de un perfil de calidad se consigue con equipos topográficos y el Dipstick, ya que miden directamente el desnivel entre dos puntos del pavimento.

El estado del pavimento de una carretera en función del periodo de diseño de un pavimento en ejes equivalentes, puede ser representado con la siguiente figura.

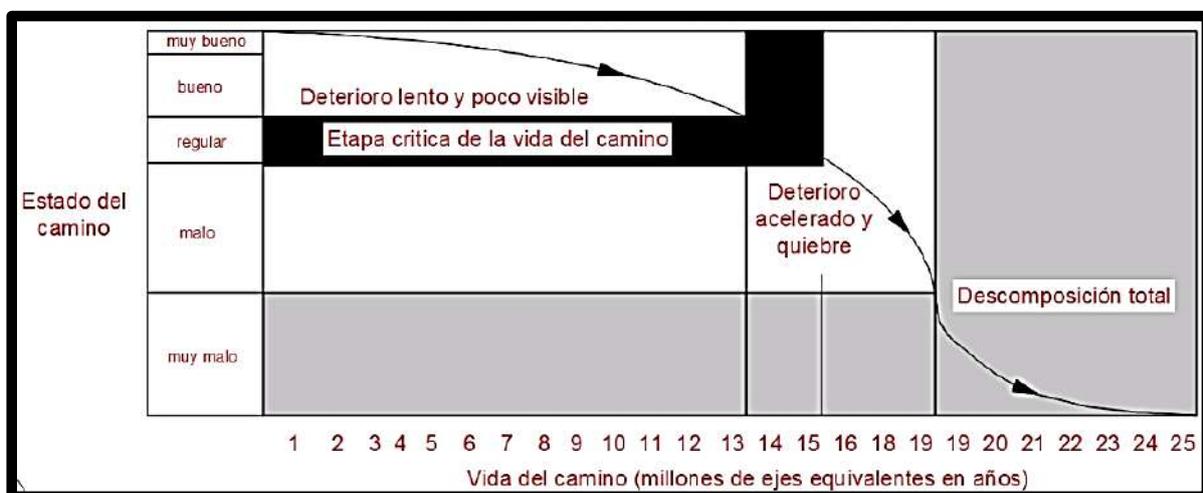


Figura 24. Esquema del deterioro del pavimento en función del tiempo. Fuente: Solminihac T. (obtenido de Martínez Alarcón, Tesis de Pregrado, 2015)

El índice de Rugosidad Internacional – IRI, obtenido en una evaluación funcional de un pavimento, sirve de valor de entrada para hallar el Índice de Serviciabilidad Presente – PSI, mediante ecuaciones que relacionan dichos conceptos con vimos en la anterior sección, existen además métodos numéricos para



obtener curvas aproximadas que describen el comportamiento de la vida útil de un pavimento.

Debido a las limitaciones que se tienen, como los parámetros usados en el diseño de pavimentos, la información completa del tráfico en el diseño del pavimento; en la presente investigación se utilizará la metodología empleada por Ramirez Beltrán y Colucci (2001), en donde en su artículo emplean la distribución Weibull para estimar la vida remanente de un pavimento flexible.

La Distribución Weibull es una distribución de probabilidad continua. Descubierta por Waloddi Weibull, quién dio una descripción detallada de la distribución en 1951.

En Ingeniería las aplicaciones estadísticas en modelaciones pueden ser de dos tipos:

- **Procesos estocásticos:** Es un conjunto de variables aleatorias que depende de un parámetro o un argumento. La variable aleatoria tiene una Distribución de Probabilidad dada. Éstos procesos se clasifican en estacionarios cuando tienen características que lo hacen de cierta forma predecible, y no estacionarios o impredecibles.
- **Procesos Deterministas:** Es aquel que el azar no está involucrado en el desarrollo de futuros estados del sistema, se caracteriza por que siempre resultará la misma salida a partir de las mismas condiciones iniciales.

Ramirez Beltrán y Colucci (2001) utilizan la Distribución Weibull en donde la variable aleatoria es el tráfico o el flujo vehicular, pues ésta es impredecible.

En otros procesos de ingeniería la Distribución Weibull se utiliza para modelar también procesos estocásticos relacionados con el tiempo de fabricación y distribución de bienes, tiene dos parámetros k que es el parámetro de forma y λ es el parámetro de escala.



La distribución modela la distribución, valga la redundancia, de fallos (en sistemas) cuando la tasa de fallos es proporcional a una potencia del tiempo:

- Un valor $k < 1$ indica que la tasa de fallos decrece con el tiempo.
- Cuando $k = 1$, la tasa de fallos es constante en el tiempo.
- Un valor $k > 1$ indica que la tasa de fallos crece con el tiempo

Por lo descrito en la sección anterior, podemos considerar que el Índice de Rugosidad Internacional - IRI calculado con la Mira y Nivel y por el Dipstick, por la alta precisión de ambos métodos son semejantes.

$$IRI_d \approx IRI_n$$

Para el método de la estimación de la vida remanente del pavimento con la Distribución Weibull, fue desarrollado con el IRI del Dipstick.

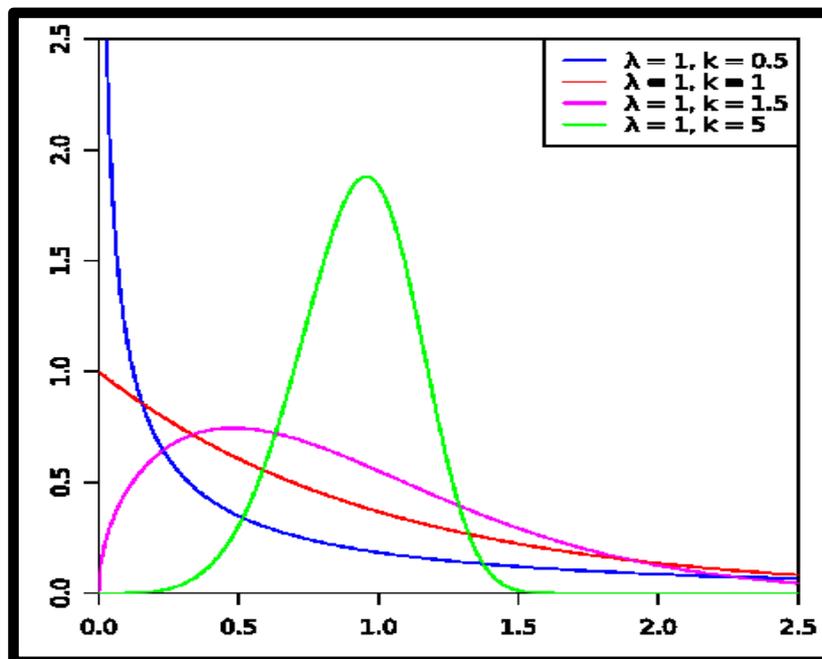


Figura 25. Función de Densidad de la distribución Weibull. Fuente: www.wikipedia.org



Los pasos que se consideran en según el método de Weibull los cuales se detallan en el artículo dado por Ramirez Beltrán y Colucci (2001):

- **Primer paso. Determinar si la carretera presenta todavía vida remanente**

Para ello debemos utilizar las expresiones que relacionan el Índice de Rugosidad Internacional – IRI con el Índice de Serviciabilidad Presente – PSI, presentadas en la anterior sección.

Notemos que, si el valor de Índice de Serviciabilidad no es inferior al valor de 2.0 para carreteras, indicado por AASHTO Guía para el diseño de estructura de pavimento. Washington D.C. 1993. P. II-10; todavía presenta vida remanente

- **Segundo paso. Estimar la carga al momento de análisis**

Se calcula la carga de análisis al momento de análisis, para ello se utilizará la relación elaborada por Colucci et al. (1997):

$$W_{18} = \rho \left(\frac{P_0 - P}{P_0 - P_f} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

Dónde: P₀: Nivel inicial del servicio

P_f: Nivel del servicio terminal

P: Nivel de servicio en el momento de análisis

ρ y β : Parámetros de la función de desempeño

W₁₈: Carga acumulada al momento de análisis



- **Tercer paso. Calcular la carga acumulada para conseguir el nivel terminal**

$$W_f = \alpha(-\ln(h))^{\frac{1}{\gamma}}$$

Dónde: α y γ : Parámetros de la región montañosa en función del clima de la región

1-h: Probabilidad que el segmento de la carretera alcance el nivel de servicio terminal.

W_f : Carga acumulada para llegar al nivel terminal

Tabla 18. Parámetros de la Distribución Weibull

Parámetro de la Distribución	Región Climática			
	Montañosa	Seca	Húmeda	Mojada
α	7.24	15.98	6.83	12.03
γ	11.70	14.52	16.27	13.04

Fuente: Ramirez Beltrán y Colucci (2001)

- **Cuarto paso. Determinar la vida remanente**

De acuerdo a la recomendación de la Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras Estatales– AASTHO (1993), porcentaje de vida remanente para el segmento de carretera se puede calcular de la siguiente manera:

$$RL = 100 \left(1 - \frac{W_{18}}{W_f} \right) \%$$

Dónde: RL: Porcentaje de vida remanente

W_{18} : Carga acumulada al momento de análisis

W_f : Carga acumulada para llegar al nivel terminal

2.2.14. Evaluación estructural de un pavimento

2.2.14.1. Antecedentes de los modelos de comportamiento de un pavimento

Un aspecto gravitante en las metodologías de evaluación de pavimentos es el concerniente a los modelos teóricos usados para representar a la estructura real y su funcionamiento. De cuan adecuados sean éstos para reproducir, en forma satisfactoria, la compleja realidad de un pavimento y de la posibilidad de representarlos matemáticamente, a fin de implementar soluciones que brinden resultados de uso directo, depende el potencial de posibilidades prácticas que puede brindar una metodología. (S. Hoffman & M. del Águila, 1985, págs. 7,8)

Reyes (Como se citó en Balarezo, 2017), afirma que el primero que comenzó todo, fue Boussinesq, quien propuso en 1885 como primer análisis considerar al pavimento como “un semiespacio homogéneo, que tiene un área y una profundidad infinita con una carpeta delgada encima, donde son aplicadas las cargas”, a fin de tener una buena representación del pavimento bajo la acción de cargas. Posteriormente M. Burmister en 1943, basándose en los conceptos y análisis propuestos por Boussinesq, desarrolló la teoría de capas elásticas. Esta teoría se podía aplicar a estructuras de pavimentos, el procedimiento de ésta teoría es compleja pues involucra Transformadas de Furier, de Hankel y series de Bessel.

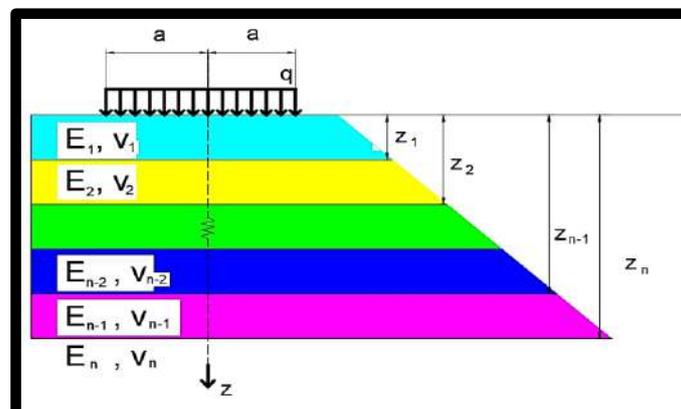


Figura 26. Análisis de capas elástica. Fuente: Burmister (Recuperado de Balarezo, 1017)

2.2.14.2. Modelo de Hogg

En el año 1944, A.H.A. Hogg presentó la solución matemática del modelo que se conoce por su nombre. Este modelo representa al pavimento como una placa delgada con una cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita, sustentada por una capa elástica homogénea e isotrópica, de espesor que puede ser infinito o limitado por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa. La figura describe la geometría y los parámetros del modelo de Hogg. (Hoffman & del Águila, 1985, pág. 8)

A continuación, se muestra un esquema o representación en el modelo de Hogg de la estructura del pavimento, y se adjunta una tabla con los valores o parámetros básicos necesarios para la evaluación del pavimento.

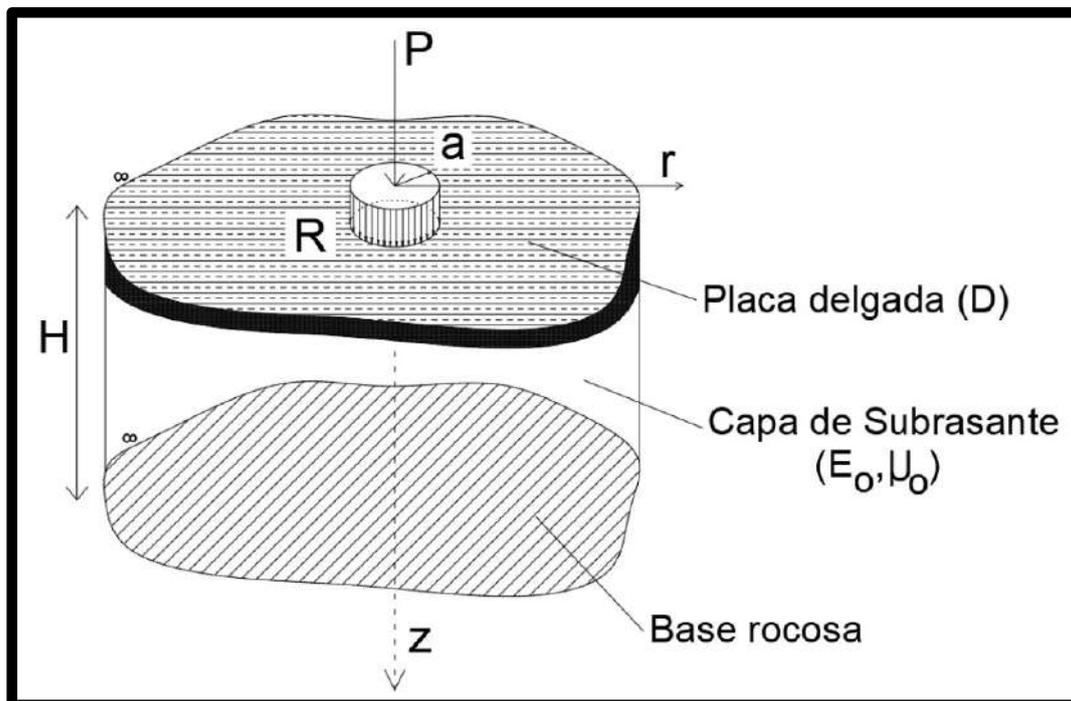


Figura 27. Esquema del modelo de Hoog. Fuente: S. Hoffman y M. del Águila (1985)



Tabla 19. Parámetros del Modelo de Hoog

Parámetros básicos del modelo	$D = \frac{E_1 t^3}{12(1-\mu_1^2)}$ (tn-m)	Rigidez a la flexión a la placa
	$l_0 = \frac{D(1+\mu_0)(3-4\mu_0)^{\frac{1}{3}}}{2(1-\mu_0)E_0}$ (cm)	Longitud característica
	E_0 (Kg/cm ²)	Módulo de elasticidad de la subrasante
	μ_0 (Adimensional)	Módulo de poisson de la subrasante
	H (cm)	Profundidad del estrato rocoso
Parámetros de evaluación	l_0, E_0, D	Se obtienen conociendo valores de deflexiones medidas

Fuente: S. Hoffman y M. del Águila (1985)

2.2.14.3. Equipos que evalúan estructuralmente el pavimento

En la actualidad existen una variedad de equipos, desde los más simples hasta los más sofisticados, costosos y complejos, los cuales, empezaron a desarrollarse a partir de la interpretación del cuenco de deflexiones que se produce en la superficie del pavimento por acción de una carga conocida y normalizada. Ésta evolución es continua y a la par, con el avance tecnológico que se viene dando en el mundo en las últimas décadas.

La Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras Estatales– AASTHO (2011) en su norma Medidas de Deflexiones en Pavimentos, da las condiciones generales de los equipos que miden las deflexiones en los pavimentos a



evaluar. Entre los aparatos que se mencionan en dicha norma, los clasifica en:

- Aparatos de Carga estática no continua y semicontinua, estos son los que operan con el principio de brazo de nivel, el cual mide las desviaciones verticales que suceden en la superficie de un pavimento debido a la carga normalizada en el pavimento. A este tipo pertenecen la Viga Benkelman de brazo simple y de doble brazo.



Figura 28. Deflectometría con la Viga Benkelman. Fuente: www.mecanicista.com

- Aparatos de carga estática continua, son aquellos que operan como su nombre refiere, miden continuamente en un carril y están equipados con sensores y una carga normalizada para recolectar datos de deflexiones en el pavimento.



Figura 29. Deflectógrafo LACROIX-03 de chasis largo. Fuente: www.geocisa.com

- Aparatos de carga de impulso, que crea un impulso en la superficie del pavimento para medir las deflexiones que se producen a diferentes distancias. También es conocido como Deflectómetro de Peso Descendente (FWD). Se utiliza tanto en pavimentos rígidos como flexibles debido a que la mayoría de estos equipos se adaptan a la circunstancia. Estos equipos tienen o presentan sensores o geófonos que se sitúan debajo de la placa de carga a diferentes distancias del punto de impacto o carga.



Figura 30. Falling Weight Deflectometer. Fuente: www.thetranstecgroup.com



2.2.15. Evaluación estructural de un pavimento con la Viga Benkelman

2.2.15.1. Generalidades

La Viga Benkelman es llamada así, en honor del Ing. A.C. Benkelman, quien desarrolló en 1953 este aparato, como parte de los ensayos viales de la WASHO. Desde entonces su uso se ha difundido a nivel mundial para la evaluación de pavimentos flexibles, y en países con pocos recursos como el nuestro, representa una alternativa simple y barata para la evaluación estructural de pavimentos de vías de competencia regional y distrital.

2.2.15.2. Principio de funcionamiento de la Viga Benkelman

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC, en su norma MTC E 1002, del manual de ensayo de materiales, en el cual da las pautas generales en la medida de deflexión de un pavimento flexibles empleando la Viga Benkelman, describe el principio de funcionamiento de este equipo, el cual consta de dos partes:

- Un cuerpo de sostén que se sitúa directamente sobre el terreno mediante tres apoyos: dos delanteros fijos A y uno trasero regulable B.
- Un brazo móvil acoplado al cuerpo fijo mediante una articulación de giro o pivote C, uno de cuyos extremos se apoya sobre el terreno - punto D; y el otro se encuentra en contacto sensible con el vástago del dial de movimiento vertical - punto E ($DC = 2,44\text{m}$, $CE = 0,61\text{ m}$). Adicionalmente el equipo posee un vibrador incorporado. 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 del 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, generando así una lectura en el dial. 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.

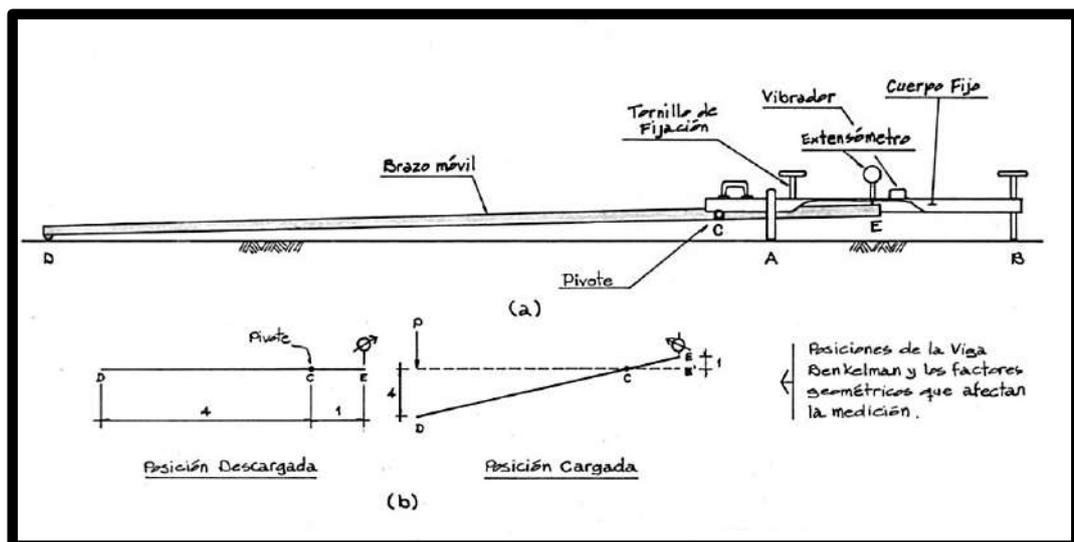


Figura 31. Esquema y operación de Viga Benkelman. Fuente: Hoffman y del Águila (1985)

En la prueba se requiere un camión con carga normalizada de 8.2 tn en el eje posterior, presión de inflado de las llantas, tamaño de las llantas y espaciamiento de ruedas duales, el cual se moverá en su dirección y se estacionará a distancias determinadas para poder tomar las lecturas con la Viga Benkelman.

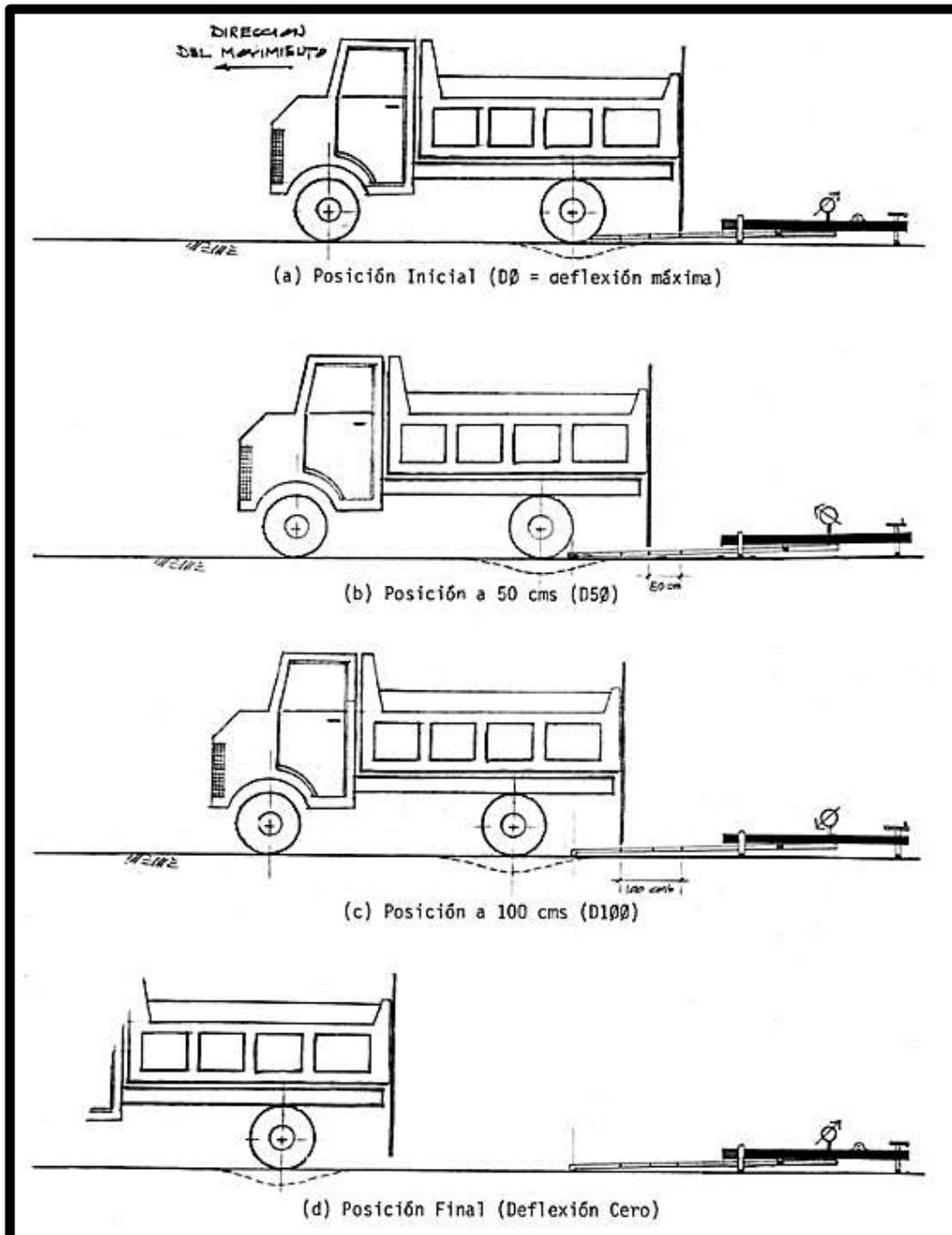


Figura 32. Esquematización del proceso de medición con la Viga Benkelman. Fuente: Hoffman y del águila (1985)

2.2.15.2.1. Aspectos importantes a considerar el desarrollo de la Prueba de evaluación deflectométrica del pavimento con la Viga Benkelman

En cuanto a los requisitos del camión Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC en su manual de ensayos de materiales (2016). Ítem E 1002 referido a la



medida de la deflexión de un pavimento flexible empleando la Viga Benkelman, indica en su acápite 4.1.3: “Un camión para ensayo con las siguientes características, (...). Las llantas deberán de ser 10”x20”, (...). La distancia entre los puntos medios de la banda de rodamiento de ambas llantas de cada rueda dual debe de ser de 32 m” (p.963).

También sobre el peso del camión, la norma dada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC en su manual de ensayos de materiales (2016). Ítem E 1002 referido a la medida de la deflexión de un pavimento flexible empleando la Viga Benkelman, indica en su acápite 4.1.3, también indica: “(...), el eje trasero pesará en la balanza 8.2 toneladas, igualmente distribuidos en sus ruedas duales y estará equipado con llantas de caucho y cámaras neumáticas. (...)” (p. 963).

Es importante controlar la absorción de humedad por parte de los materiales utilizados para llegar al peso bruto de 8.2 toneladas en la parte posterior. El método estándar de prueba para mediciones de deflexión del pavimento - AASTHO Designación: T256-01(2011), indica en su párrafo 7.2.2: “(...). Inmediatamente previo a la prueba, pesar la carga del eje del camión si el lastre consiste de un material que puede absorber humedad (arena, grava, etc.) o podría tener cambios por cualquier razón. (...)” (p. 90).

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC en su manual de ensayos de materiales (2016). Ítem E 1002 referido a la medida de la deflexión de un pavimento flexible empleando la Viga Benkelman, sobre la presión de inflado en la prueba en su acápite 4.1.3, indica: “(...); 12 lonas e infladas a 5.6 kg/cm² (80 libras por pulgada cuadrada)” (p.963). La mayoría de autores



afirman que en la etapa de campo se debe de controlar que la presión de inflado, se halle dentro del intervalo entre 75 y 85 PSI.

Sobre el punto donde se medirán las deflexiones con la Viga Benkelman, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC en su manual de ensayos de materiales (2016). Ítem E 1002 referido a la medida de la deflexión de un pavimento flexible empleando la Viga Benkelman, en su acápite 5.3.2, indica: “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 esto último se dificulta por la inaccesibilidad tanto visual como manual, se realizará previamente la siguiente operación:

Se coloca la Viga en la 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, 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” (p.965).

Sobre el procedimiento de medición de la temperatura del pavimento, la norma El método estándar de prueba para mediciones de deflexión del pavimento - AASTHO Designación: T256-01(2011), establece que la temperatura en la superficie del pavimento y la presión de inflado se deben de verificar por lo menos cada hora.

Sobre la ubicación del punto de evaluación en el pavimento flexible, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC en su manual de ensayos de materiales (2016). Ítem E 1002 referido



al punto de ensayo en la medida de la deflexión de un pavimento flexible empleando la Viga Benkelman, en su acápite 5.3.2, indica: “El punto del pavimento a ser ensayado deberá de ser marcado convenientemente con una línea transversal al camino. Sobre dicha línea será localizado el punto de ensayo a una distancia prefijada del borde. Se recomienda las distancias indicadas en la tabla 20” (p. 964).

Tabla 20. Distancias del punto de ensayo del borde en función del ancho de carril

Ancho del carril	Distancia del punto de ensayo desde el borde del pavimento
2.70 m	0.45 m
3.00 m	0.60 m
3.30 m	0.75 m
3.60 m o más	0.90 m

Fuente: Manual de ensayo de Materiales – MTC, p.964

Por su parte la Dirección de Caminos y Ferrocarriles del Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC, en su Manual de Inventarios Viales (2013), con respecto a los intervalos de las mediciones de deflexiones con la Viga Benkelman indica: “(...). La ubicación de cada punto de medida puede alterarse por seguridad (o para evitar zonas excepcionales como puentes y alcantarillas) y puede modificarse entre las huellas de los carriles, aunque se recomienda medir la deflexión en la huella derecha ya que se considera que generalmente está más dañada que la otra huella.

De acuerdo a la Dirección de Caminos y Ferrocarriles del Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC, en su Manual de Inventarios Viales (2013), con respecto a los intervalos de las mediciones de deflexiones con la Viga Benkelman indica: “Las mediciones se realizan con una frecuencia de muestreo de 200 metros por faja, pero se puede obtener valores a menor



distancia si se realiza de manera intercalada, en todo caso, se debe mantener el espaciamiento señalado para cada faja de la calzada” (p.171).

Contrastando con la norma, El método estándar de prueba para mediciones de deflexión del pavimento - AASTHO Designation: T256-01(2011) en su acápite 9.3, podemos clasificar a la evaluación estructural en la presente investigación como: Prueba de Nivel de Proyecto General, con intervalos establecidos entre 50m y 200 m.

Como recomendación del Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC en su manual de ensayos de materiales (2016). Ítem E 1002 referido al punto de ensayo en la medida de la deflexión de un pavimento flexible empleando la Viga Benkelman, en su acápite 5.3.3, indica: “De igual forma con la finalidad de obtener el cuenco de deflexiones, 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 70 cm). 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” (p. 964).

2.2.15.2.2. Análisis e interpretación de las deflexiones recolectadas en el pavimento

En la presente tesis se utilizará la metodología del modelo de Hogg para el análisis e interpretación de cuenco de deflexiones tomadas, según la norma es recomendable tomar 3 medidas de deflexión por punto ensayado, en la presente tesis se realizará las mediciones a 0 cm, 25 cm, 50 cm, 100 cm y 8 m.

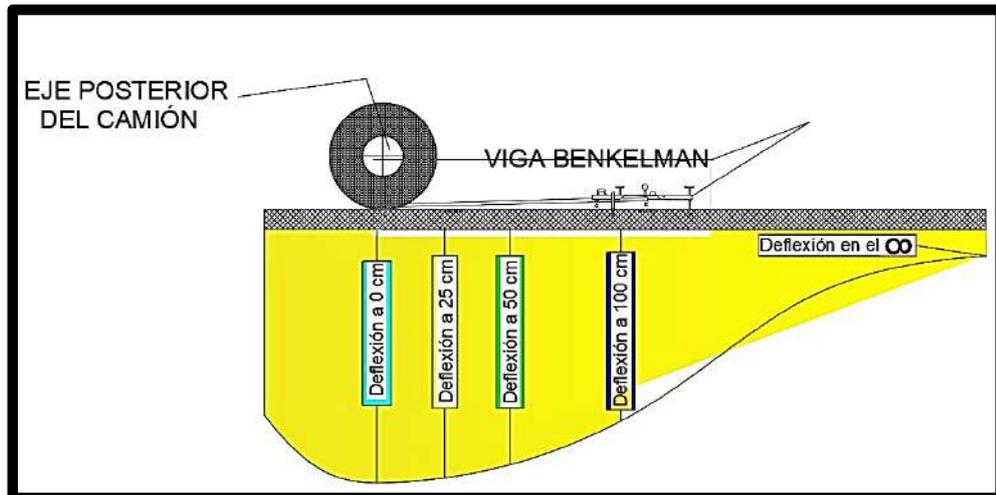


Figura 33. Mediciones de deflexiones a 0 cm, 25 cm, 50 cm, 100 cm y en el infinito. Fuente: Elaboración propia 2019

Los datos o lecturas obtenidas en el campo con la Viga Benkelman, con ellos se deben de calcular las deflexiones en el eje y en cada distancia adicional estos serán D_0 , D_{25} , D_{50} , D_{100} , D_{∞} . Para realizar una evaluación cualitativa sobre las curvas de deflexiones, como se muestra en la siguiente figura.

Posteriormente, las deflexiones obtenidas del campo se corrigen por la relación de longitudes del brazo de la Viga, generalmente las Vigas son de relación 1: 4 o 1:2.

Las medidas realizadas en el campo se realizan a una temperatura a tener en cuenta al momento de realizar las lecturas. Por ello, se deben de ajustar a la temperatura estándar de 20 grados centígrados usando la siguiente fórmula indicado en Consorcio de Rehabilitación Vial- CONREVIAl, MTC – Perú (1983), con la fórmula siguiente:

$$D_{20^{\circ}} = \frac{D_t}{(10^{-3} * e * (t - 20) + 1)}$$

Dónde:

D_t : Deflexión recuperable en centésimos de mm, medida a la temperatura “t”° C.

$D_{20^{\circ}}$: Deflexión recuperable a la temperatura estándar de (20 °C)



e: Espesor de mezclas asfálticas en cm, medido en el borde del pavimento

Una vez corregidas por temperatura, también se debe de aplicar un factor de corrección posteriormente a las deflexiones características, de acuerdo a la estación en donde se realizó los ensayos de campo. El análisis deflectométrico de la vía debe de ser realizado en la época más crítica, es decir, con la presencia de lluvias. Si se realiza en época de periodo seco, deben de corregirse con factores indicados en tabla siguiente, recomendado por el método del Consorcio de Rehabilitación Vial- CONREVIAL, MTC – Perú (1983).

Estos factores dependen principalmente, del tipo de material de la subrasante (arena o arcilla) y de la estación del año.

Tabla 21. Coeficientes de corrección por estacionalidad a las deflexiones características

Tipo de suelo de la subrasante	Coeficiente de corrección	
	Periodo de lluvias	Periodo seco
Arena permeable	1.0	1.1 – 1.3
Arcilla sensible al agua	1.0	1.2 – 1.4

Fuente: Consorcio de Rehabilitación Vial - CONREVIAL (obtenido de Mamani de la Cruz, Informe de Suficiencia, 2011)

2.2.15.2.3. Evaluación de los tramos por el Método del Consorcio de Rehabilitación Vial- CONREVIAL, MTC – Perú (1983)

El método de Consorcio de Rehabilitación Vial en el Perú MTC – CONREVIAL (citado en Mamani de la Cruz, Informe de Suficiencia, 2011), indica que para evaluar los tramos o las unidades de muestra por un método deflectométrico con la Viga Benkelman, una vez obtenido las deflexiones corregidas, se requiere los siguientes parámetros:

- **Radio de Curvatura**

Este parámetro considera que las deflexiones medidas en el pavimento se aproximan a una parábola hasta una distancia algo mayor de 25 cm, sufriendo una inflexión para atender asintóticamente hacia la horizontal.

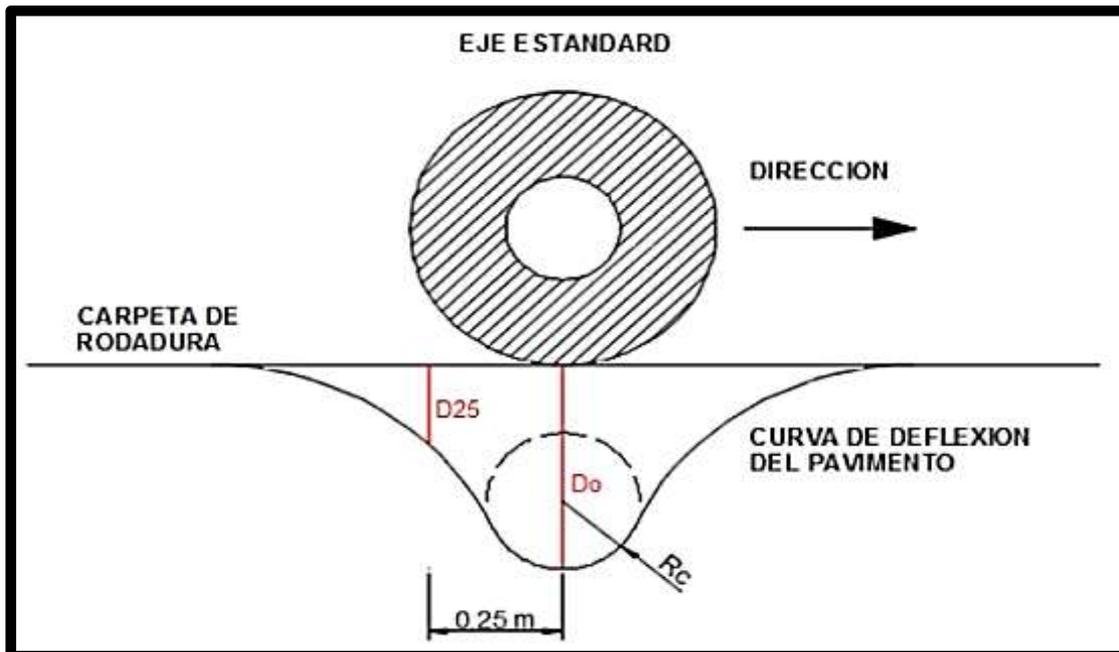


Figura 34. Radio de Curvatura en la deflexión del pavimento. Fuente: Reyes Lizcano (Obtenido de Cubas de la Torre, Tesis de Pregrado, 2017)

Se calcula con la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{6250}{2 * (D_0 - D_{25})}$$

Dónde:

R_c : Radio de Curvatura (m)

D_0 : Deflexión máxima corregida por temperatura en el eje vertical de la carga (1/100 mm)

D_{25} : Deflexión máxima corregida por temperatura a 25 cm del eje (1/100 mm)



- **Deflexión característica y su análisis estadístico**

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC, en su Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2013), establece 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 que para cada sector homogéneo le corresponde deflexión característica, que es el valor que representa un determinado sector” (pág. 198).

Los parámetros para cada sector homogéneo se hallan con las siguientes ecuaciones, según el método del Consorcio de Rehabilitación Vial en el Perú MTC – CONREVIAL (citado en Mamani de la Cruz, Informe de Suficiencia, 2011), si las deflexiones siguen una distribución normal.

- **Deflexión media:**

$$D_m = \frac{\sum D}{N}$$

Dónde:

D_m : Media aritmética de los valores individuales

D : Valor individual de un ensayo

N : Número de ensayos individuales

- **Desviación estándar:** Este valor representa la dispersión de resultados en pavimentos que posean el mismo valor medio D_m .

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sum(D - D_m)^2}{N - 1}\right)}$$



Dónde:

D_m : Media aritmética de los valores individuales

D : Valor individual de un ensayo

N : Número de ensayos individuales

Ambos parámetros se utilizan con la siguiente tabla dada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC, según el tipo de carretera evaluada.

Tabla 22. Definición de Deflexión Característica según tipo de carretera

Tipo de Carretera	Deflexión Característica D_c	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 600 veh/día de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	$D_c = D_m + 1.645 \cdot d_s$	Deflexión característica para una confiabilidad de 95 %.
Carreteras Duales o Multicarril: carretera de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	$D_c = D_m + 1.645 \cdot d_s$	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	$D_c = D_m + 1.645 \cdot d_s$	Deflexión característica para una confiabilidad de 95 %.

Continúa...



Tipo de Carretera	Deflexión Característica D_c	Observación
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles	$D_c = D_m + 1.282 * d_s$	Deflexión característica para una confiabilidad de 90 %.
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 401-201 veh/día, de una calzada de dos carriles	$D_c = D_m + 1.282 * d_s$	Deflexión característica para una confiabilidad de 90 %.
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un $IMDA \leq 200$ Veh/día, de una calzada	$D_c = D_m + 1.036 * d_s$	Deflexión característica para una confiabilidad de 85 %.

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC: Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2013)

- **Deflexión admisible**

Según el método del Consorcio de Rehabilitación Vial en el Perú MTC – CONREVIAl (citado en Mamani de la Cruz, Informe de Suficiencia, 2011), la define: “Esta deflexión corresponde a aquella que alcanzará el pavimento al final del tiempo de diseño. Por lo tanto, esta deflexión se calcula considerando la sollicitación de cargas para ese tiempo de diseño, representado por el valor “N” de ejes equivalentes acumulados hasta el último día de servicio” (pág. 83).

Se calcula con la siguiente expresión:

$$D_{adm} = \left(\frac{1.15}{N_{18}} \right)^{\frac{1}{4}}$$



Dónde:

N_{18} : Número de ejes estándar equivalentes a 8.2 toneladas acumulados en el periodo de diseño.

D_{adm} : Deflexión característica admisible en mm.

- **Juicio de la capacidad estructural del pavimento**

Según el análisis del Consorcio de Rehabilitación Vial en el Perú MTC – CONREVIAL (citado en Mamani de la Cruz, Informe de Suficiencia, 2011), tanto la deflexión característica como la deflexión admisible, de cada tramo homogéneo se comparan. Posteriormente, se deduce de la comparación, si la capacidad del pavimento es la adecuada, para las cargas de tránsito circundantes y la acción del clima, o si la estructura se encuentra fatigada y requiere un refuerzo estructural parcial o total. Para establecer el juicio sobre la capacidad estructural, se adoptó el criterio racional que combina tres factores principales.

- La apariencia de la superficie en relación a la observación de fallas de acuerdo a los resultados de la inspección visual.
- La deflexión recuperable del pavimento como parámetro indicativo de la respuesta del mismo, complementado con el radio de curvatura de la deflexión.
- La estructura del pavimento, determinada en base a sondeos y antecedentes disponibles, que implica una compleja relación entre espesores y calidad de las capas del pavimento, suelo y otros.

A continuación, se muestra un cuadro, en donde se indican las posibilidades que puede dar la comparación de los valores de: deflexiones características y las deflexiones admisibles, con el posible estado estructural que presenta el pavimento, según la metodología del Estudio de Rehabilitación de la carretera en el Perú MTC – CONREVIAL.

Tabla 23. Juicio de la capacidad estructural del pavimento

Deflectometría	Estado Visual	Estado Estructural	Recomendaciones
La deflexión característica es superior a la admisible. Los radios de curvatura son elevados aceptables (en relación a la estructura). $D_c > D_a$ y $+R_c$	No hay fallas de origen estructural.	Estructura infra-diseñada, pero la capacidad portante de las capas decrece en profundidad (No existe capa débil inmediatamente debajo de la capa asfáltica).	Examinar fecha y tipo de las últimas obras ejecutadas, para justificar el estado del pavimento. PRIMER CASO
La deflexión característica es superior a la admisible. Los radios de curvatura son elevados o aceptables (en relación a la estructura). $D_c > D_a$ y $+R_c$	Hay fallas de origen estructural generalizadas.	Estructura infra-diseñada, pero la capacidad portante de las capas decrece en profundidad (No existe capa débil inmediatamente debajo de la capa asfáltica).	Hay acuerdo de todas las variables: A) Las deflexiones son empleadas para el cálculo del refuerzo. B) Para deflexiones muy fuertes analizar económicamente la reconstrucción. C) Verificar refuerzo con otros métodos de diseño SEGUNDO CASO
La deflexión característica es superior a la admisible. Los radios de curvatura son pequeños (aún para deflexiones reducidas) $D_c > D_a$ y $-R_c$	Hay fallas de origen estructural generalizadas.	Existe una capa débil inmediatamente debajo de las capas asfálticas (Relación entre módulos de elasticidad es menor que 1).	Se trata de neutralizar el efecto de la capa de falla, ya sea por reconstrucción parcial o refuerzo. No es conveniente emplear las deflexiones ya que puede no ser representativas. TERCER CASO
La deflexión característica es superior a la admisible. Los radios de curvatura son reducidos. $D_c < D_a$ y $-R_c$	Hay fallas de origen estructural por fatiga (fisuras tipo piel de cocodrilo).	Existe una capa débil inmediatamente debajo de las capas asfálticas.	Analizar fecha de mediciones y tipo de estructura. Neutralizar el efecto de la capa débil (Reconstrucción o refuerzo). De ninguna manera se puede considerar las deflexiones para el proyecto, emplear métodos de diseño. TERCER CASO
La deflexión característica es inferior a la admisible. $D_c < D_a$	Hay fallas de origen estructural: Deformaciones permanentes en la fundación.	Estructura no adecuada para la fundación.	Evaluar aporte de la calzada existente. (reconstrucción o refuerzo). La deflexión no es representativa. CUARTO CASO
La deflexión característica es inferior a la admisible. $D_c < D_a$	No hay fallas de origen estructural	Estructura bien diseñada	Corregir fallas de origen superficial: las soluciones dependerán de los defectos observados y sus causas. Mejora superficial. QUINTO CASO

Fuente: Estudio de Rehabilitación de la carretera en el Perú MTC – CONREVIAl (obtenido de Mamani de la Cruz, Informe de Suficiencia, 2011)



2.2.16. Estimación del porcentaje de vida remanente útil a partir de una evaluación estructural con la Viga Benkelman

Inicialmente, debe de hallarse el EAL de Diseño de la carretera o es que se puede obtener directamente del expediente de la construcción de dicha infraestructura. En el caso que no se disponga en EAL de diseño se debe de proceder de la siguiente forma:

- **Primero:** Se debe de obtener el Índice Medio Diario Anual base donde se elaboró el expediente técnico, con su correspondiente composición vehicular.
- **Segundo:** Este Índice Medio Diario Anual - IMDA se debe de proyectar al año en donde se pone en operación la carretera por cada tipo de vehículo, con la fórmula siguiente:

$$T_n = T_0 * (1 + i)^{n-1}$$

Dónde:

T_n : Tránsito proyectado al año en vehículos por día

T_0 : Tránsito actual (año base) en vehículos por día

i : Año futuro de proyección

n : Tasa anual de crecimiento de tránsito

Las tasas de crecimiento de tránsito deben de ser del año en donde se realizó Índice Medio Diario Anual – IMDA Base, y deben de ser diferenciados dependiendo del tipo de vehículo. Si es vehículo ligero de pasajeros se debe de utilizar el crecimiento poblacional de dicho año. Si es vehículo de carga se utiliza la tasa de crecimiento del Producto Bruto Interno - PBI regional.

Para la presente Investigación, de acuerdo a lo indicado por Gómez Allende y Quispe Mejía (Tesis de Pregrado, 2017), quienes tuvieron

acceso al Expediente Técnico de la Carretera ENACO – Abra Ccorao, se utilizó las siguientes tasas de crecimiento:

Tabla 24. Tipos de Tasas Crecimiento

Tasa de Crecimiento en vehículos	Tipo de Tasas de Crecimiento (Año 2008)	Valor en porcentaje (Año 2008)
Tasa de crecimiento de vehículos ligeros	Tasa de crecimiento poblacional	1
Tasa de crecimiento de vehículos de carga	Tasa de crecimiento PBI	4.3

Fuente: Expediente Técnico (citado en Gómez Allende y Quispe Mejía, Tesis de Pregrado, 2017)

- Tercero:** Se debe de calcular los Factores de Destrucción o Equivalentes de Carga para todos los tipos de vehículos que transitan en dicha carretera, estos se hallan en el Manual de Carretera, Suelos, Geología, Geotécnia (2013) y Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC. Los pesos máximos en cada eje están indicados en el Reglamento Nacional Vehículos (2003) dadas por el MTC, en el Anexo IV. A continuación, se da un modelo de los pesos y medidas máximos para los tipos C2, C3 y C4.

Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. (m)	Peso máximo (t)				Peso bruto máx. (t)	
			Eje Delant	Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º		4º
C2		12,30	7	11	---	---	---	18
C3		13,20	7	18	---	---	---	25
C4		13,20	7	23 ⁽¹⁾	---	---	---	30

Figura 35. Pesos y Medidas para los vehículos C2, C3 y C4. Fuente: Reglamento Nacional Vehículos (2003) - MTC



Con estos pesos máximos se halla los Factores Equivalentes de Carga; y se hallan acuerdo al siguiente cuadro en función del tipo de eje y tipo de pavimento:

Tabla 25. Relación de cargas por Eje para determinar Ejes Equivalente (EE), para Afirmados, Pavimentos Flexibles y Semirrígidos.

Tipo de Eje	Eje Equivalente (EE _{8.2 tn})
Eje simple de ruedas simples (EE _{S1})	$EE_{S1}=[P/6.6]^{4.0}$
Eje simple de ruedas dobles (EE _{S2})	$EE_{S2}=[P/8.2]^{4.0}$
Eje Tandem (1 eje ruedas dobles + 1 eje rueda simple)(EE _{TA1})	$EE_{TA1}=[P/14.8]^{4.0}$
Eje Tandem (2 ejes de ruedas dobles)(EE _{TA2})	$EE_{TA2}=[P/15.1]^{4.0}$
Ejes Tridem (2 ejes ruedas dobles + 1 eje rueda simple)(EE _{TR1})	$EE_{TR1}=[P/20.7]^{3.9}$
Ejes Tridem (3 ejes de ruedas dobles)(EE _{TR2})	$EE_{TR2}=[P/21.8]^{3.9}$
P=Peso real por eje en toneladas	

Fuente: Guía AASTHO'93(Indicado en Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotécnia y Pavimentos – 2013)

Estos ejes equivalentes de carga se calculan para tipo de vehículo que compone la clasificación vehicular en dicho tramo de la carretera.

Con el Índice Medio Diario Anual – IMDA proyectado hasta el año de puesta en operación y con tasas de crecimiento, se puede hallar los EAL de diseño, el Número de Ejes Equivalentes (N) de 8.2 toneladas y correspondientemente la deflexión admisible.

El número de Ejes Equivalentes (N) de 8.2 toneladas se halla con la siguiente fórmula, según la Asociación Estadounidense de Oficiales y Transporte por Carretera – AASHTO, el cual es citado por Cabrera Huamanchumo (Informe de Suficiencia, 2010):



$$N_{18} = 365 * (IMD_{om} * FEC_{om} + IMD_{2e} * FEC_{2e} + \dots + IMD_i * FEC_t) * FD * FC * \left[\frac{(1 + r)^n - 1}{r} \right]$$

Dónde:

N_{18} : Número esperado de repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 tn.

FD : 0.5, corresponde a caminos en dos direcciones por calzada (recomendable)

FC : 1.0, corresponde a un carril por dirección o sentido

IMD_i : Índice medio diario de vehículos tipo "i".

FEC_t : Factor Equivalente de Carga de 8.2 tn por cada tipo de vehículo.

r : Tasa de crecimiento anual por tipo de vehículo.

n : Periodo de diseño en años.

Finalmente, la vida remanente útil de un pavimento se halla graficando las deflexiones características de cada año, y contrastando con la deflexión admisible. A continuación, se muestra una forma el gráfico a partir del cual se calcula este periodo según la metodología del Estudio de Rehabilitación de la carretera en el Perú MTC – CONREVIAL.

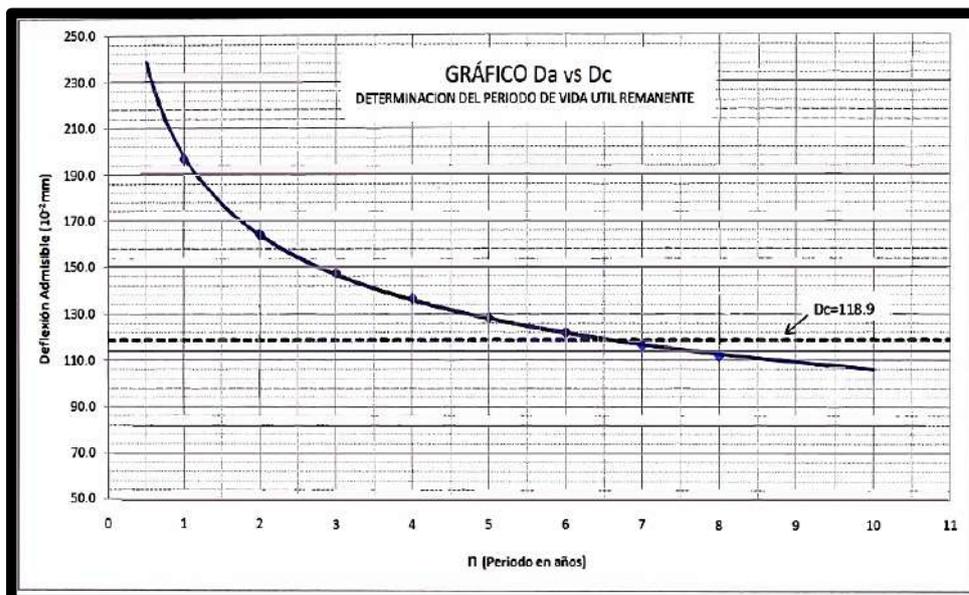


Figura 36. Determinación del periodo de vida útil remanente. Fuente: Díaz Ruiz (Informe de Suficiencia, 2010)