

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA
CARRETERA CAJAMARCA-JESÚS, TRAMO Dv. A LLACANORA
(PLAZA PECUARIA ISCOCONGA)-LA HUARACLLA; PARA
DETERMINAR SU COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL.**

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

Presentado por el Bachiller:

ISIDRO QUITO SANGAY

Asesor

Ing. ALEJANDRO CUBAS BECERRA

Cajamarca - Perú

2019

COPYRIGHT © 2019 by
ISIDRO QUITO SANGAY
Todos los derechos reservados

DEDICATORIA

A mi Dios todopoderoso por darme la vida, la salud y sabiduría, por darme fuerzas para afrontar los obstáculos y seguir adelante y no desmayar en el camino, por permitirme culminar con éxito mis estudios.

A mi padre, Rosario Quito Julcamoro porque en vida me dio todo su cariño y apoyo para salir adelante y ahora desde el cielo sé que me guía y me cuida en todo momento. a mi madrecita Fausta Sangay Aquino por ser el pilar más importante en mi vida, su amor infinito, por sus incasables consejos día a día, por su apoyo incondicional, esfuerzo y sacrificio en darme una educación.

A mis hermanos Manuel, Catalina, María y Rosa por sus consejos, su apoyo incondicional, por compartir momentos de alegría y tristeza, por estar siempre presentes y pendientes de mí, motivándome a seguir adelante.

A mis amigos que Jhoel L., Óscar B. y Houston R, por su amistad, sus consejos y apoyo moral en momentos difíciles.

AGRADECIMIENTO

Agradezco el apoyo y orientación de mi asesor, el ing. Alejandro Cubas Becerra, quien, con su vasta experiencia, me asistió en todo el trayecto de este trabajo, por haber dedicado su valioso tiempo en la revisión de mis avances y sugerencia que contribuyeron a realizar mi proyecto de tesis.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Formulación del problema	3
1.4. Hipótesis de investigación	3
1.4.1. Definición de variables.....	4
1.4.2. Operacionalización de variables	4
1.4.3. Matriz de consistencia	5
1.5. Justificación de la investigación	6
1.6. Objetivos.....	7
1.6.1. Objetivo general	7
1.6.2. Objetivos específicos.....	7
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes teóricos.....	8
2.1.1. Antecedentes internacionales	8
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	9
2.1.3. Antecedentes locales	10
2.2. Bases teóricas.....	11
2.2.1. definición de pavimento.....	11
2.2.2. Pavimento flexible	12
A. Carpeta Asfáltica	13
B. Base.....	13
C. Subbase	15
D. Subrasante.....	16
2.2.3. Esfuerzos producidos en la estructura del pavimento asfáltico.....	18
2.2.4. Tipos de fallas en pavimentos flexibles.....	20
2.2.5. Evaluación estructural de pavimentos.....	23
2.2.6. Solicitaciones principales de un pavimento.....	26
2.2.6.1 Tránsito.....	26
2.2.6.2 Clima	29
2.2.7. Modelos de comportamiento del pavimento.	29
2.2.8. Métodos de evaluación estructural.	33
2.2.8.1 Métodos directos de auscultación.....	34
2.2.8.2 Métodos indirectos de auscultación estructural.....	34
A. Medición de deflexión estática o de movimiento lento.....	36

B. Medición de deflexión por cargas de impacto	37
2.2.9. Viga Benkelman	38
2.2.10. Deflexiones en pavimentos.....	40
A. Cálculo de las deflexiones	40
B. Corrección por temperatura.....	41
C. Corrección por estacionalidad.....	42
2.2.11. Análisis de la capacidad estructural usando la metodología CONREAVIAL.....	42
A. Determinación del radio de curvatura.....	43
B. Deflexión característica	44
C. Deflexión admisible	46
D. Deflexión crítica.....	46
2.3. Definición de términos básicos	47
CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	49
3.1. Periodo de estudio.....	49
3.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio	49
3.3. Materiales	50
3.3.1. Unidad de estudio.....	50
3.3.2. Población	50
3.3.3. Muestra.....	50
3.4. Material, Instrumentos y equipos	50
3.5. Metodología de la investigación	53
3.5.1. Tipo de investigación	53
3.5.2. Procedimiento y técnicas de recolección de datos	53
3.6. Procedimiento para medir deflexiones utilizando la viga Benkelman	54
3.6.1. Procedimiento.....	55
3.7. Formatos de inspección.....	62
3.8. Tratamiento, análisis de datos y presentación de resultados	62
3.9. Análisis de los resultados usando la metodología CONREAVIAL. ..	64
3.9.1. Radio de curvatura	65
3.9.2. Análisis de los radios de curvatura.....	65
3.10. Criterios de evaluación estructural del pavimento.....	66
CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	70
4.1. Información preliminar	70
4.2. Antecedentes	70
4.3. Carga de tránsito.....	70
4.4. Aplicación del método para mediciones de deformaciones en pavimentos.....	71
4.5. Muestreo y unidades de muestra.....	71
4.6. Procedimiento de inspección.....	72
4.7. Determinación de las deflexiones en el pavimento	73

Unidad de muestra U-01.....	74
Unidad de muestra U-02.....	75
Unidad de muestra U-03.....	76
Unidad de muestra U-04.....	77
Unidad de muestra U-05.....	78
Unidad de muestra U-06.....	79
Unidad de muestra U-07.....	80
Unidad de muestra U-08.....	81
Unidad de muestra U-09.....	82
Unidad de muestra U-10.....	83
Unidad de muestra U-11.....	84
Unidad de muestra U-12.....	85
Unidad de muestra U-13.....	86
Unidad de muestra U-14.....	87
Unidad de muestra U-15.....	88
Unidad de muestra U-16.....	89
Unidad de muestra U-17.....	90
Unidad de muestra U-18.....	91
Unidad de muestra U-19.....	92
Unidad de muestra U-20.....	93
Unidad de muestra U-21.....	94
Unidad de muestra U-22.....	95
Unidad de muestra U-23.....	96
Unidad de muestra U-24.....	97
Unidad de muestra U-25.....	98
Unidad de muestra U-26.....	99
4.8. Interpretación de resultados	100
4.8.1. Cálculo de los parámetros	101
4.9. Evaluación de los parámetros.....	102
4.10. Análisis de resultados	103
4.11. Contrastación de la hipótesis	111
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112
5.1. Conclusiones	112
5.2. Recomendaciones	113
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
ANEXO 1	115
ANEXO 2	122
ANEXO 3.....	127
ANEXO 4.....	148

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Tipo de carpeta asfáltica según intensidad del tránsito</i>	13
<i>Tabla 2: Características Físico-mecánicas.</i>	14
<i>Tabla 3: Requerimientos Agregado Grueso.</i>	14
<i>Tabla 4: Requerimientos Agregado Fino.</i>	15
<i>Tabla 5: Requerimientos de Ensayos Especiales.</i>	16
<i>Tabla 6: Categorías de Subrasante.</i>	17
<i>Tabla 7: Determinación teórica de deflexiones según Ahlvin y Ulery.</i>	32
<i>Tabla 8: Tabla de Factores de Corrección por Estacionalidad.</i>	42
<i>Tabla 9: Valor de “t” y probabilidad de ocurrencia de $D > D_c$</i>	45
<i>Tabla 10: Ubicación geográfica</i>	49
<i>Tabla 11. Tabla de distancias para ensayos.</i>	56
<i>Tabla 12: Lecturas de las diferentes Unidades de muestras Evaluadas</i>	63
<i>Tabla 13. Deflexiones corregidas, km 00+000 - km 01+000.</i>	64
<i>Tabla 14. Características del Pavimento de acuerdo al Tipo de Deflexión y Radio de Curvatura.</i>	67
<i>Tabla 15: Criterios para la Evaluación Estructural de Pavimentos.</i>	69
<i>Tabla 16: Unidades de muestra a evaluar.</i>	72
<i>Tabla 17. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	74
<i>Tabla 18. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	75
<i>Tabla 19. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	76
<i>Tabla 20: Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	77
<i>Tabla 21. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	78
<i>Tabla 22. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	79
<i>Tabla 23. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	80
<i>Tabla 24. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	81

<i>Tabla 25. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 26. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 27. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 28. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 29. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 30. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 31. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 32. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 33. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 34. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 35. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 36. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 37. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 38. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 39. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 40. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 41. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 42. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 43. Deflexiones y radio de curvatura.</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 44. Parámetros respecto a la deflexión máxima, D_0 ($\times 10^{-2}$) mm</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 45: Evaluacion de los parametros.....</i>	<i>102</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Paquete estructural</i>	11
<i>Figura 2: Paquete estructural</i>	12
<i>Figura 3. Distribución e incremento de esfuerzos de un pavimento flexible.</i>	17
<i>Figura 4:Distribución de esfuerzos en un pavimento flexible</i>	18
<i>Figura 5. Deformaciones en un pavimento flexible</i>	19
<i>Figura 6:Curva esfuerzo – deformación</i>	20
<i>Figura 7. Pérdida de serviciabilidad en un pavimento flexible</i>	21
<i>Figura 8:Falla funcional en un pavimento flexible.</i>	21
<i>Figura 9. Falla estructural en un pavimento flexible.</i>	23
<i>Figura 10. Resultados de una evaluación estructural</i>	26
<i>Figura 11:Comparación de la distribución de cargas en pavimentos</i>	27
<i>Figura 12. Modelo de comportamiento Hogg.</i>	30
<i>Figura 13. Esquema ideal del comportamiento del cuenco de deflexiones</i>	35
<i>Figura 14. Equipo viga Benkelman instalada entre</i>	36
<i>Figura 15:Deflectómetro de impacto (FWD)</i>	37
<i>Figura 16:Esquema viga Benkelman</i>	38
<i>Figura 17. Principio de uso de viga Benkelman.</i>	40
<i>Figura 18. Deformada del pavimento y parámetros de comparación</i>	43
<i>Figura 19. Odómetro</i>	50
<i>Figura 20. Viga Benkelman</i>	51
<i>Figura 21. Camión para ensayo.</i>	52
<i>Figura 22. Pesaje del camión volquete (C2)</i>	52
<i>Figura 23:Termómetro para medir la temperatura de la carpeta asfáltica.</i>	53
<i>Figura 24. Marcado de la vía, para la toma de datos</i>	56
<i>Figura 25. Ubicación del centro de gravedad del eje posterior.</i>	57

<i>Figura 26. Alineamiento del extremo de la viga Benkelman</i>	58
<i>Figura 27:División de la viga Benkelman en secciones</i>	58
<i>Figura 28 a. Posición inicial ($D_0 =$ Deflexión máxima).</i>	60
<i>Figura 29:c. Posición final ($D = 0$)</i>	61

ÍNDICE DE FÓRMULAS

<i>Ecuación 1. Rigidez a la flexión de la placa.....</i>	<i>30</i>
<i>Ecuación 2. Longitud característica</i>	<i>30</i>
<i>Ecuación 3. Cálculo de la deformación en la superficie.....</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 4. Cálculo de ϕ de la deformación en la superficie.....</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 5. Cálculo de la deflexión</i>	<i>32</i>
<i>Ecuación 6. Corrección por Temperatura.....</i>	<i>41</i>
<i>Ecuación 7. Radio de curvatura</i>	<i>44</i>
<i>Ecuación 8. Deflexión promedio.....</i>	<i>44</i>
<i>Ecuación 9. Desviación estándar.....</i>	<i>44</i>
<i>Ecuación 10. Coeficiente de variación</i>	<i>44</i>
<i>Ecuación 11: Deflexión característica.....</i>	<i>45</i>
<i>Ecuación 12: Deflexión admisible.....</i>	<i>46</i>
<i>Ecuación 13: Deflexión crítica.....</i>	<i>46</i>

ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Grafico 1: Comportamiento de la subrasante.....</i>	<i>104</i>
<i>Grafico 2: Comportamiento del pavimento.....</i>	<i>105</i>
<i>Grafico 3: Calidad estructural.....</i>	<i>106</i>
<i>Grafico 4: Radio de curvatura vs progresivas Km 00+000 al Km 05+000.</i>	<i>108</i>
<i>Grafico 5: Deflectograma, Km 00+000 al Km 05+000</i>	<i>109</i>
<i>Grafico 6. Cuenco de deflexiones, km 00+00 al km 05+000</i>	<i>110</i>

LISTA DE SIGLAS Y DE SÍMBOLOS

SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway
ASSHO	American Society of State Highway Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBR	California Bearing Ratio
CONREVIAl	Consorcio de Rehabilitación Vial
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EALS	Equivalent Single Axle Loads
FWD	Falling Weight Deflectometer
MTC	Ministerio de Transporte y Comunicaciones
NDT	Non Destructive Test
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodetic System

SÍMBOLOS

D_o	Deflexión máxima
D_c	Deflexión característica
D_t	Deflexión medida a la temperatura del pavimento
D_{cr}	Deflexión crítica
D_p	Deflexión promedio
D_{adm}	Deflexión admisible
C_v	Coefficiente de variación
E	Módulo de elasticidad de un material cualquiera
E_1	Módulo de elasticidad del pavimento
E_o	Módulo de elasticidad de la subrasante
P	Carga
F_c	Factor de crecimiento
F_e	Factor de equivalencia
R_c	Radio de curvatura
D_v	Desvio

RESUMEN

La presente tesis, denominado *“Análisis deflectométrico del pavimento flexible de la carretera Cajamarca-Jesús, tramo Dv. a Llacanora (plaza pecuaria Iscoconga) - la Huaraclla, para determinar su comportamiento estructural”*, nace a raíz de los múltiples problemas de deterioros o fallas que se presentan en las vías de nuestra región y del País, es por eso que surge la necesidad de ver, Cuál es el comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Cajamarca-Jesús, en su tramo D.v a Llacanora-la Huaraclla y que tiene como objetivo principal determinar el comportamiento y evolución estructural del pavimento flexible. Esta investigación comprendió el desarrollo progresivo de diferentes etapas, la cual se inicia con el reconocimiento, levantamiento topográfico, medición de deflexiones, estudio de tránsito y el procesamiento de datos obtenidos en campo y el análisis de resultados que nos permitan determinar el comportamiento estructural del pavimento flexible.

El ensayo comprendió la tomado de 26 unidades de muestra cada 200 metros, para ello se utilizó un camión de dos ejes, cuyo eje posterior de 8.2 toneladas peso, y la Viga Benkelman de doble brazo a través de la cual se registrarían las deflexiones presentes en el pavimento en estudio, para luego ser analizados siguiendo los parámetros estipulados por el CONREVIAl, obteniendo los siguientes resultados: una deflexión característica de 116.7×10^{-2} mm, mayor que la deflexión admisible 86.2×10^{-2} mm, una deflexión promedio de 85.2×10^{-2} mm y un radio de curvatura promedio de 130 metros, llegando a la conclusión que la vía presenta un comportamiento estructural en regular estado de calidad.

Palabras clave: Pavimento, Subrasante, Viga Benkelman, Deflexión, Radio de curvatura, comportamiento.

ABSTRACT

This thesis, called "analysis section deflectometrico of Cajamarca-Jesus road flexible pavement, Dv. to Llacanora (livestock square Iscocongá) - the Huaracilla, to determine their structural behaviour", was born as a result of the multiple problems damage or faults that arise in the developing of our region and the country, that's that there is a need to see, what the structural behavior of the flexible pavement of the road Cajamarca-Jesus, D.v to Llacanora - the Huaracilla section and has as objective principal to determine behavior and structural evolution of the flexible pavement. This research included the development of different stages, which begins with the recognition, topographic survey, measurement of deflections, study of transit and processing of data obtained in field and the analysis of results it allow us to determine the structural behaviour of the pavement flexible. The trial included the 26 sample units taken every 200 meters, was used a two-axle truck, whose rear hub of 8.2 tons weight, and the Benkelman beam of double arm through which would be registered in the pavement in estu deflections It gave, to then be analyzed according to the parameters set forth by the CONREVIAl, with the following results: deflection characteristic of 116.7×10^{-2} mm greater than the permissible deflection 86.1×10^{-2} mm, average deflection of 85.2×10^{-2} mm and a radius of mean curvature of 130 meters, reaching the conclusion that via presents a structural behavior lies in regular State of deterioration.

Keywords: Pavement, Subrasante, Beam Benkelman, Deflection, radius of curvature, Behavior.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Las carreteras y vías urbanas son un factor muy importante en el desarrollo socio-económico de la región y del país, siendo el transporte un elemento de gran influencia en la economía, y la serviciabilidad de las carreteras.

Las redes viales que unen a los pueblos son las que promueven un verdadero desarrollo social, cultural y económico de una región, Sin embargo, conforme al paso del tiempo, el crecimiento del parque automotor tanto en número como en carga, combinado con los pavimentos que han sido diseñados para soportar condiciones de esfuerzo menores, ha provocado que exista un alto grado de deterioro de estas mismas.

El deterioro que se va presentando a lo largo de las vías provoca una disminución del nivel de serviciabilidad que debe ser controlado y es por ello que es necesario evaluar la condición de las vías en cualquier momento de su periodo de vida útil.

El presente trabajo de investigación consiste en la determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Cajamarca– Jesús, mediante el análisis deflectométrico de las capas del pavimento flexible cimentado sobre una sub-rasante constituida por suelo limoso y arcilloso.

Las grandes ciudades de la región vienen experimentando un acelerado crecimiento del parque automotor que ha generado un proceso de deterioro estructural debido a causas asociadas a su uso, diseño y proceso constructivo llegando a afectar a la población del área de influencia, no siendo ajena las vías que comunica la ciudad de Cajamarca y el distrito de Jesús, Es así que surge la necesidad de conocer el comportamiento estructural actual del pavimento de la carretera Cajamarca-Jesús a través del análisis deflectométrico.

Mediante la determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Cajamarca-Jesús, se podrá tomar medidas de reparación del paquete estructural del pavimento en estudio, con el fin de mejorar la serviciabilidad presente de dicha vía.

La presente tesis se ha dividido en cinco capítulos. El primer capítulo es competente a la introducción, la formulación, el planteamiento del problema, la hipótesis, la justificación del estudio realizado y el planteamiento de los objetivos.

En el segundo capítulo, se explica el marco teórico, donde se define el concepto de pavimento y su clasificación, los tipos de evaluación estructural en los pavimentos y finalmente la metodología usada para la evaluación estructural, basado en las deflexiones del pavimento.

En el tercer capítulo, se describe la zona de estudio y los materiales usados para la medición de deflexiones en el pavimento, el procedimiento, así como los formatos para la toma de medidas y presentación de resultados.

En el cuarto capítulo, presentamos el cálculo de las deflexiones para las muestras obtenidas en el campo y su análisis, así como el resumen de evaluación de las deflexiones, radios de curvatura y la discusión de resultados. Así también en el quinto capítulo presentamos las conclusiones y las recomendaciones.

1.2. Planteamiento del problema

Los pavimentos son diseñados para ofrecer seguridad, confort y economía para los vehículos que transitan sobre él, con el paso del tiempo el efecto repetitivo de las cargas del tránsito, la acción climática, las deficiencias constructivas o de los materiales utilizados, inducen a un deterioro que se va presentando a lo largo de la vía que provoca una disminución de servicio sobre su estructura que debe ser controlado, y es por eso que es necesario evaluar la condición de la vía en cualquier momento de sus vida útil.

Así por ejemplo en el pavimento asfáltico de la carretera Cajamarca - Jesús, se ha podido observar múltiples fallas generando molestias y riesgos de accidentes permanentes. Este deterioro estructural, manifestada en, fisuras, ahuellamientos, baches la asociamos como posibles causas al uso, diseño y proceso constructivo; razón por la cual es necesario evaluarla y conocer el comportamiento estructural mediante el análisis deflectométrico, que nos permita conocer la condición de la vía y así poder decidir el tratamiento que se deberá plantear a fin de mantenerla con la serviciabilidad adecuada y prolongar su vida útil.

Realizar el análisis deflectométrico implica obtener deflexiones mediante el empleo de la viga de Benkelman que nos servirá para realizar un modelo matemático basadas en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie del pavimento, mediante el cual se va determinar la capacidad estructural.

En este contexto, esta investigación se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento, y así ver la necesidad de su preservación y rehabilitación. Dentro del marco de registro de información sobre pavimentos, comparados con los establecidos a la normativa establecida ASTM D4695, cuyos resultados podrían ser utilizados para que las autoridades implanten decisiones de política y de gestión en mejora de un problema de evaluación estructural.

1.3. Formulación del problema

¿Cuál es el comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Cajamarca-Jesús, tramo desvío a Llacanora- la Huaraclla por acción del tráfico en las capas actuantes?

1.4. Hipótesis de investigación

El estado del pavimento flexible de la carretera Cajamarca-Jesús en su tramo desvío a Llacanora-la Huaraclla presenta un comportamiento estructural de mala calidad.

1.4.1. Definición de variables

✓ **variable dependiente**

El comportamiento estructural del sistema pavimento subrasante.

✓ **variable independiente**

Las deflexiones del sistema pavimento subrasante.

1.4.2. Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
Deflexiones	Deformación vertical que experimenta el sistema pavimento subrasante cuando está actuando sobre él, una carga estandarizada.	Deformación vertical	mm
Comportamiento estructural	Respuesta del sistema pavimento subrasante ante la aplicación de las cargas del tránsito.	Capacidad de recuperación	Deflexiones Tipo I: curva extensa poco profunda Tipo II: curva extensa y profunda Tipo III: curva corta y poca profunda Tipo IV: curva corta y profunda

1.4.3. Matriz de consistencia

Problema	Hipótesis	Objetivo	Variables	Metodología	Instrumento
¿Cuál es el comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Cajamarca-Jesús, tramo desvío a Llacanora- la Huaraclla por acción del tráfico en las capas actuantes?	El pavimento flexible de la carretera Cajamarca-Jesús en su tramo desvío a Llacanora-la Huaraclla presenta un comportamiento estructural de mala calidad, esto en función a las deflexiones medidas con la viga Benkelman.	Determinar el comportamiento estructural del pavimento flexible de la Carretera Cajamarca - Jesús, Tramo desvío a Llacanora - La Huaraclla, a partir de la medición de deflexiones.	V.D: El comportamiento estructural del sistema pavimento subrasante. V.I: Las deflexiones del sistema pavimento subrasante.	<p><u>Tipo de Investigación</u> Investigación experimental</p> <p><u>Nivel de Investigación</u> -Descriptiva, explicativa y comparativa</p> <p><u>Diseño de Investigación</u> -experimental</p> <p><u>Población</u> -establecida por los pavimentos flexibles que conducen al distrito de Jesús. por todos los cálculos de deflexiones admisibles, realizadas durante la realización del trabajo de investigación.</p> <p><u>Muestras</u> Establecida por los 5 km de vía asfaltada. Específicamente se realizarán 26 ensayos por sección de pavimento, ubicadas cada 200 metros a través del perfil de la carretera.</p> <p><u>Técnicas de instrumentos de recolección de datos</u> observación directa observación documental</p>	Viga Benkelman

1.5. Justificación de la investigación

La mayoría de las vías del departamento de Cajamarca y del País han presentado muchas deficiencias con respecto a la calidad y durabilidad en un lapso de tiempo inferior a la de su vida útil, esto debido al complejo comportamiento de los pavimentos asfálticos, las fallas de un pavimento pueden ser causados por diversos factores como agentes climáticos, cargas de tráfico mayor a las previstas en el diseño, así como en el tráfico de carga pesada o de deficiencias en el proceso constructivo. Por ello es adecuado tener un sistema de control de calidad que involucre la aplicación de metodologías prácticas para realizar el monitoreo y verificación de todos los procesos para lograr un mejor desempeño vial.

Aplicar una metodología para el control de deflexiones en las capas de la subrasante, subbase, base y carpeta de rodadura que permita detectar puntos que denoten inestabilidad y así poder corregir a tiempo los daños en el paquete estructural.

El resultado de esta investigación busca proveer de datos actuales respecto al comportamiento estructural y realizar trabajos de mantenimiento para contar con un pavimento flexible que obtenga una buena capacidad estructural y tenga un buen comportamiento en cada una de las capas del paquete estructural con el fin de brindar una mejor transitabilidad tanto en el transporte de carga como de pasajeros que circulan por la carretera Cajamarca - Jesús, Tramo Dv. a Llacanora - La Huaraclla, que es la principal entrada hacia el distrito de Jesús, por la cual se transporta gran parte de su comercio y turismo.

Además, los aportes del presente trabajo de investigación servirán de guía para otros investigadores interesados en el tema de pavimentos, así como Institutos y Universidades que desarrollan programas de pavimentos y estudio deflectométrico de las capas del pavimento flexible.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

- ✓ Determinar el comportamiento estructural del pavimento flexible de la Carretera Cajamarca - Jesús, Tramo desvió a Llacanora - La Huaraclla, a partir de la medición de deflexiones.

1.6.2. Objetivos específicos

- ✓ Realizar el levantamiento topográfico.
- ✓ Realizar el estudio de tráfico.
- ✓ Determinar los valores de las deflexiones del pavimento flexible por acción de las cargas actuantes del tráfico.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos

2.1.1. Antecedentes internacionales

La evaluación estructural puede ser determinada a partir de las deflexiones producidas en la superficie de un pavimento flexible, por acción de cargas vehiculares, las cuales son determinadas haciendo uso de un deflectómetro tales como el denominado “Viga Benkelman”. Llamado así en honor al Ing. A.C. Benkelman, quien la desarrollo en 1953 como parte del programa de ensayos viales de la AASHTO Road Test. Desde entonces su uso se ha difundido ampliamente en proyectos de evaluación estructural de pavimentos flexibles, tanto por su practicidad como por la naturaleza directa y objetiva del resultado que proporciona.

Karin Alexander Escobar Aguirre, Alberto Alonso García García y Carlos Rolando Guzmán López (2007) en su tesis “Análisis comparativo de la evaluación de pavimentos por medio de la viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto”. El Salvador. Se determina una correlación entre los datos obtenidos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (FWD), a partir de la medición de deflexiones.

Roy Barrantes, Fabián Elizondo, Gustavo Badilla y Denia Silvaja (2008) en su informe “Análisis Estructural del Pavimento Esterillos – Loma”. Costa Rica. Describe la evaluación de la capacidad estructural de la carretera, donde se procedió a realizar un análisis estructural, aplicando la metodología de retrocálculo, a partir de los datos de los materiales constitutivos del pavimento y espesores de capa recolectados mediante sondeos realizados por parte del Lanamme UCR, además de los resultados de deflectometría y una evaluación visual realizados también por parte de Lanamme UCR.

Edisson Ávila Redrovan, Flavio Albarracín Ilivisaca (2014) en su tesis “Evaluación de Pavimentos en base a métodos no destructivos y análisis inverso, caso de estudio: vía chicti – Sevilla de oro”. Ecuador. Se realiza el análisis de la factibilidad y eficiencia de la deflectometría para la evaluación de la capacidad portante de la estructura del pavimento, a través de la aplicación de metodologías de análisis inverso.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Castro (2003) En la tesis Universitaria “Propuesta de gestión de pavimentos para la ciudad de Piura” tiene como objetivo principal, brindar una alternativa al problema del mantenimiento de la infraestructura vial, mediante un sistema de gestión de pavimentos, dentro de la organización municipal y concluye que cuando se decide pavimentar o reforzar un camino con un tráfico de más de 500 vehículos diarios y es difícil controlar las cargas por eje, es probable que el ahorro económico que se derive de la construcción sea inferior al costo de las fallas prematuras del pavimento. Por lo tanto, en las ciudades, como Piura, en que es difícil hacer cumplir los límites de carga los caminos deben construirse inicialmente con arreglo a normas elevadas, aun cuando esto por lo general significa la construcción de menos caminos.

Milton Eduardo Jiménez Lagos (2014) En la tesis Universitaria “diagnostico estructural de afirmado estabilizado con cloruro de magnesio mediante el modelo matemático de Hogg y Viga Benkelman” tiene como objetivo principal analizar el comportamiento estructural que posee el afirmado estabilizado con cloruro de magnesio del tramo Supe – Caral, obteniendo los módulos elásticos de la subrasante y con ello el CBR en cada punto ensayado, con esto se pudo determinar qué sectores necesitan mantenimiento y que otros necesitan mejoramiento de subrasante, además se calculó la diferencia de costo entre realizar una base estabilizada con cloruro de magnesio y otra simplemente afirmada, resultando más barato la primera opción en un periodo de diez años.

2.1.3. Antecedentes locales

Jhonny Alejandro Ignacio Malca (2013) En la Universidad Nacional de Cajamarca, en la Tesis “Análisis Deflectométrico de las capas del pavimento flexible con Subrasante de suelo arenoso en la Panamericana Norte km 355+500 al 375+500”, el análisis se realizó con los ensayos de deflexiones que se tomaron en la carpeta de rodadura, los que dan la idea de cómo se comporta el pavimento y la Subrasante mediante la interpretación de las curvas de deflexiones obtenidas, estos se procesaron en gabinete, obteniendo una buena capacidad estructural en todo el tramo de estudio. Además, se controló las deflexiones en todas las capas del paquete estructural y Subrasante donde se construyó el pavimento flexible con la finalidad de evaluar puntos que noten inestabilidad. Así como también se determinó cualitativamente la capacidad estructura del pavimento flexible mediante experiencia recopilada en obra y con el apoyo de fórmulas empíricas sustentados por el teorema del Hogg.

Ronald Eduardo Carahuatay Chávez (2015) En la Universidad Nacional de Cajamarca, en la Tesis “Determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera San Miguel-San Pablo, tramo San Miguel Sunuden; mediante el análisis deflectométrico”, esta investigación está abocado a determinar el comportamiento estructural para lo cual se realizó ensayos de deflexiones a lo largo de cinco mil metros lineales, tomando para ello se tomaron 25 muestras.

Para los ensayos de deflectometría se utilizó un camión de dos ejes, cuyo eje posterior tiene un peso 18,000 libras, y la Viga Benkelman de doble brazo a través de la cual se registrarían las deflexiones presentes en el pavimento en estudio los que fueron analizados, siguiendo los parámetros estipulados por el CONREVIAl, obteniendo un pavimento en mal estado estructural.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. definición de pavimento

De acuerdo a la norma AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), existen dos puntos de vista para definir un pavimento: el de la ingeniería y el del usuario

De acuerdo a la ingeniería, el pavimento es un elemento estructural que se encuentra apoyado en toda su superficie sobre el terreno de fundación llamado Subrasante. Esta capa debe estar preparada para soportar un sistema de capas de espesores diferentes, denominado paquete estructural, diseñado para soportar cargas externas durante un determinado periodo de tiempo. Ver figura 1.

Desde el punto de vista del usuario, el pavimento es una superficie que debe brindar comodidad y seguridad cuando se transite sobre ella. Debe proporcionar un servicio de calidad, de manera que influya positivamente en el estilo de vida de las personas.

Figura 1: Paquete estructural



Esquema típico del paquete estructural de un pavimento

Fuente: Instituto mexicano del transporte SCT 2001

Las diferentes capas de material seleccionado que conforman el paquete estructural, reciben directamente las cargas de tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada. Es por ello que todo pavimento deberá presentar la resistencia adecuada para soportar los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua, así como abrasiones y punzonamientos (esfuerzos cortantes) producidos por el paso de personas o vehículos, la caída de objetos o la compresión de elementos que se apoyan sobre él.

Otras condiciones necesarias para garantizar el apropiado funcionamiento de un pavimento son el ancho de la vía; el trazo horizontal y vertical definido por el diseño geométrico; y la adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento, aun en condiciones húmedas.

2.2.2. Pavimento flexible

El trabajo de la presente tesis está referido a pavimentos flexibles, por lo que se explicara a detalle las capas que lo constituyen y su comportamiento frente a solicitudes externas. Los pavimentos flexibles están constituidos por las siguientes capas: carpeta asfáltica, base, subbase y Subrasante. A continuación, se explica a detalle cada uno de estos elementos.

Figura 2: Paquete estructural



Esquema típico del paquete estructural de un pavimento flexible

Fuente: Instituto mexicano del transporte SCT 2001

A. Carpeta Asfáltica

La carpeta asfáltica es la capa que se coloca en la parte superior del paquete estructural, sobre la base y es la que le proporciona la superficie de rodamiento a la vía.

Cumple la función de impermeabilizar la superficie evitando el ingreso de agua que podría saturar las capas inferiores. También evita la desintegración de las capas subyacentes y contribuye al resto de capas a soportar las cargas y distribuir los esfuerzos (cuando se construye con espesores mayores a 7.5 cm.).

La carpeta es elaborada con material pétreo seleccionado y un aglomerante que es el asfalto. Es de gran importancia conocer el contenido óptimo de asfalto a emplear, para garantizar que la carpeta resista las cargas a la que será sometida. Un exceso de asfalto en la mezcla puede provocar pérdida de estabilidad, e incluso hacer resbalosa a la superficie.

Tabla 1: Tipo de carpeta asfáltica según intensidad del tránsito

Intensidad del tránsito pesado en un solo sentido	Tipo de carpeta
<i>Mayor de 2000 veh./día</i>	<i>Mezcla en planta de 7.5 cm de espesor mínimo.</i>
<i>1000 a 2000 veh./día</i>	<i>Mezcla en planta de 5.0 cm de espesor mínimo</i>
<i>500 a 1000 veh./día</i>	<i>Mezcla en planta o en el lugar de 5.0 cm de espesor mínimo</i>
<i>Menos de 500 veh./día</i>	<i>Tratamiento superficial simple o múltiple</i>

Fuente: (Reyes Lizcano, 2003)

Esta capa es la más expuesta al intemperismo y a los efectos abrasivos de los vehículos, por lo que necesita de mantenimientos periódicos para garantizar su adecuada performance.

B. Base

Es la capa de pavimento ubicada debajo de la superficie de rodadura y tiene como función primordial soportar, distribuir y transmitir las cargas a la subbase, que se encuentra en la parte inferior.

La base puede estar constituida principalmente por material granular, como piedra triturada y mezcla natural de agregado y suelo; pero también puede estar

conformada con cemento Portland, cal o materiales bituminosos, recibiendo el nombre de base estabilizada. Estas deben tener la suficiente resistencia para recibir la carga de la superficie y transmitirla hacia los niveles inferiores del paquete estructural.

El material de la Base Granular deberá cumplir además con las siguientes características físico-mecánicas y químicas que se indican en las Tablas 2, 3 y 4

Tabla 2: Características Físico-mecánicas.

Valor Relativo de Soporte, CBR (1)	Trafico en ejes equivalentes (<10 ⁶)	Min. 80%
	Trafico en ejes equivalentes (>10 ⁶)	Min. 100%

(1) Referido al 100% de la Máxima Densidad Seca y un Penetración de Carga de 0.1" (2.5 mm)

Fuente: (EG-2013)

Tabla 3: Requerimientos Agregado Grueso.

Ensayo	Norma MTC	Norma ASTM	Norma AASHTO	Requerimientos Altitud	
				< 3.000 msnm	> 3.000 msnm
Partículas con una cara fracturada	MTC E 210	D 5821		80% min.	80% min.
Partículas con dos caras fracturadas	MTC E 210	D 5821		40% min.	50% min.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	C 131	T 96	40% máx.	40% máx.
Partículas chatas y alargadas		D 4791		15% máx.	15% máx.
Sales solubles totales	MTC E 219	D 1888		0,5% máx.	0,5% máx.
Durabilidad al sulfato de magnesio	MTC E 209	C 88	T 104		18% máx.

Fuente: (EG-2013)

Tabla 4.: Requerimientos Agregado Fino.

Ensayo	Norma	Requerimientos Altitud	
		< 3.000 msnm	> 3.000 msnm
Índice Plástico	MTC E 111	4% máx.	2% máx.
Equivalente de Arena	MTC E 114	35% máx.	45% máx.
Sales Solubles	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Durabilidad al Sulfato de Magnesio	MTC E 209	-	15%

Fuente: (EG-2013)

C. Subbase

La subbase se localiza en la parte inferior de la base, por encima de la Subrasante. Es la capa de la estructura de pavimento destinada a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas en la carpeta asfáltica.

Está conformada por materiales granulares, que le permiten trabajar como una capa de drenaje y controlador de ascensión capilar de agua, evitando fallas producidas por el hinchamiento del agua, causadas por el congelamiento, cuando se tienen bajas temperaturas. Además, la subbase controla los cambios de volumen y elasticidad del material del terreno de fundación, que serían dañinos para el pavimento.

El material que conforma la Subbase deberá cumplir los requisitos de calidad indicados en la Tabla 5.

Tabla 5:Requerimientos de Ensayos Especiales.

Ensayo	Norma MTC	Norma ASTM	Norma AASHTO	Requerimientos Altitud	
				< 3.000 msnm	> 3.000 msnm
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	C 131	T 96	50% máx.	50% máx.
CBR (1)	MTC E 132	D 1883	T 193	40% mín.	40% mín.
Limite Liquido	MTC E 110	D 4318	T 89	25% máx.	25% máx.
Índice de Plasticidad	MTC E 111	D 4318	T 90	6% máx.	4% máx.
Equivalente de Arena	MTC E 114	D 2419	T 176	25% mín.	35% mín.
Sale Solubles	MTC E 219	-	-	1% máx.	1% máx.
Partículas Chatas y Alargadas	-	D 4791	-	20% máx.	20% máx.

(1) Referido al 100% de la Máxima Densidad Seca y una Penetración de Caga de 0.1" (2.5 mm)

Fuente: (EG-2013)

D. Subrasante

La Subrasante es la capa de terreno que soporta el paquete estructural y que se extiende hasta una profundidad en la cual no influyen las cargas de tránsito. Esta capa puede estar formada en corte o relleno, dependiendo de las características del suelo encontrado. Una vez compactada, debe tener las propiedades, secciones transversales y pendientes especificadas de la vía.

Las características de la Subrasante sobre la que se asienta el pavimento, están definidas en seis (06) categorías de Subrasante, en base a su capacidad de soporte CBR.

Tabla 6: Categorías de Subrasante.

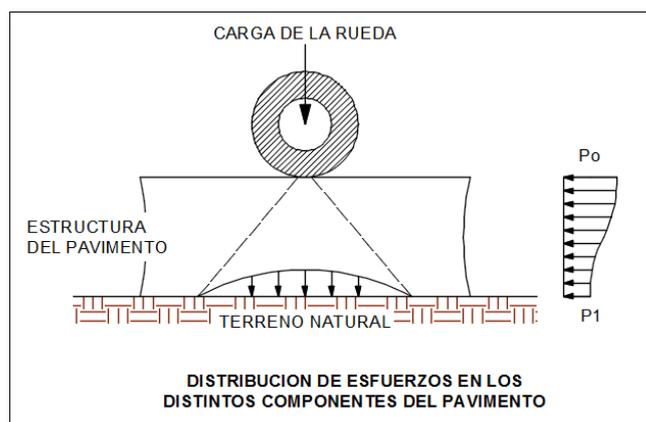
CATEGORÍAS DE SUBRASANTE	CBR
S ₀ : Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Subrasante Pobre	DE CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Subrasante Regular	DE CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Subrasante Buena	DE CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Subrasante Muy Buena	DE CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Subrasante Extraordinaria	CBR ≥ 30%

Fuente: (MTC-2013)

El espesor del pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la Subrasante, por lo que esta debe cumplir con los requisitos de estabilidad, incompresibilidad y resistencia a la expansión y contracción por efectos de la humedad.

En un pavimento flexible, la distribución de la carga está determinada por las características del sistema de capas que lo conforman. Las capas de mejor calidad están cerca de la superficie donde los esfuerzos son mayores, y estos esfuerzos se distribuyen de mayor a menor, a medida que se va profundizando hacia los niveles inferiores. Ver figura 3.

Figura 3. Distribución e incremento de esfuerzos de un pavimento flexible.



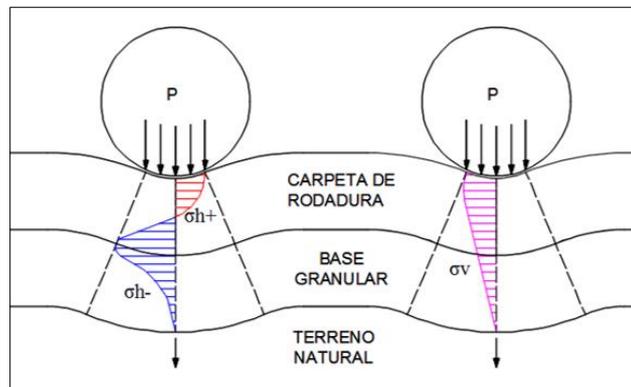
Fuente: MTC-2013

2.2.3. Esfuerzos producidos en la estructura del pavimento asfáltico

La estructura típica del pavimento en nuestro medio está formada por carpeta asfáltica y capas de material seleccionado colocadas sobre la subrasante compactada y subrasante natural, el objetivo es distribuir las cargas provenientes del tránsito, de manera que las presiones verticales a nivel de fundación sean menores a las admisibles por la estructura del pavimento.

La llanta no solo genera esfuerzos verticales sino también esfuerzos horizontales. En una estructura típica de pavimento (carpeta asfáltica, base y subbase granular) los esfuerzos horizontales se disipan a través de la carpeta asfáltica, pasando de un valor positivo en la superficie a uno negativo en su fibra interior. Los esfuerzos así generados producen fisuras que luego se reflejaran en la superficie. La Figura 4, muestra la distribución de esfuerzos horizontales (σ_h) y verticales (σ_v) de pavimentos típicos.

Figura 4: Distribución de esfuerzos en un pavimento flexible



Fuente: Carahuatay

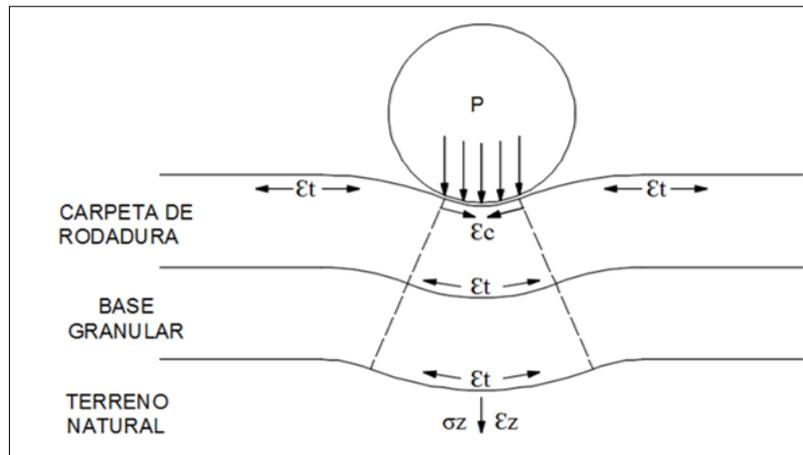
Como se observa en la Figura 4, los esfuerzos son reducidos a nivel de base granular, la carpeta de rodadura contribuye en la función estructural cuando posee un espesor mayor de 3 pulgadas, en menores espesores solo contribuye como una capa protectora del pavimento la cual distribuye los esfuerzos a la base, sin disminuirlos.

En la publicación “Análisis deformacional en el diseño de pavimentos asfálticos”, se modeló una estructura típica conformada por carpeta asfáltica, base y subbase granulares, y suelo compactado, sobre fundación débil y la alternativa de resolver el problema incrementando el espesor de la carpeta asfáltica.

Las condiciones de análisis fueron las mismas, solo se variaron el espesor de la carpeta asfáltica, las cuales fueron de 2, 4 y 6 pulgadas. Llegando a la conclusión que al incrementar el espesor de la carpeta no reduce las deformaciones por tracción, la mejor alternativa es minimizar las deformaciones plásticas a nivel de fundación mediante la estabilización.

Las principales fallas que se producen en el pavimento están asociadas a las deformaciones excesivas a nivel de la sub rasante, reflejando el comportamiento del terreno de fundación y la deformación por tracción, asociado al agrietamiento, Figura 5.

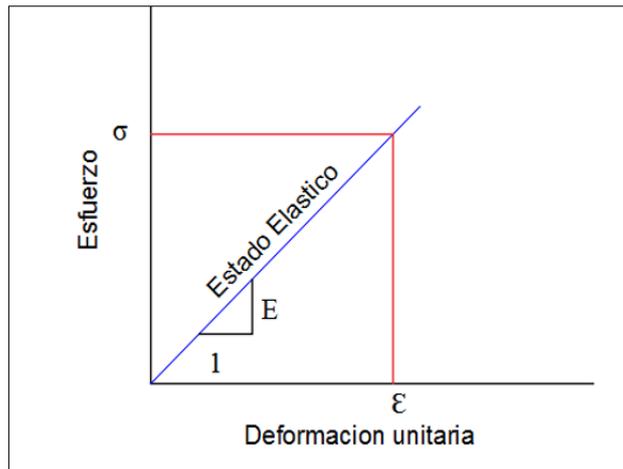
Figura 5. Deformaciones en un pavimento flexible



Fuente: Carahuatay

La Figura 6, demuestra correlación existente entre las deformaciones y esfuerzos producidos en el pavimento, indicándonos que cada material tiene un módulo de elasticidad propio, lo que no indica que, a mayor deflexión del pavimento, se sufrirá mayores esfuerzos en el pavimento.

Figura 6: Curva esfuerzo – deformación



Fuente: Carahuatay

2.2.4. Tipos de fallas en pavimentos flexibles

Durante la vida de servicio de un pavimento, causas de diversos orígenes afectan la condición de la superficie de rodamiento, lo cual compromete su función de ofrecer a los usuarios la posibilidad de un rodaje seguro, cómodo y económico. Entre las causas de falla de un pavimento se pueden mencionar:

- Fin del periodo de diseño original y ausencia de acciones de rehabilitación mayor durante el mismo. En este caso la falla es la prevista o esperada.
- Incremento del tránsito con respecto a las estimaciones del diseño de pavimento original.
- Deficiencias en el proceso constructivo, bien en procesos como tal como en la calidad de los materiales empleados.
- Diseño deficiente.
- Factores climáticos imprevistos
- Insuficiencia de estructuras de drenaje superficial y/o subterráneo.
- Insuficiencia o ausencia de mantenimiento y/o rehabilitaciones de pavimentos.

Dependiendo de su origen las fallas pueden ser clasificadas como:

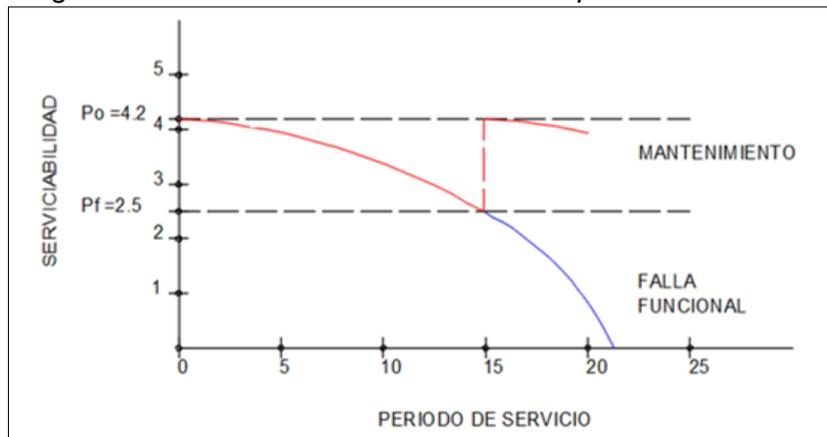
Falla funcional:

Tomando en cuenta que el índice de servicio se refiere únicamente a las condiciones de la superficie de rodamiento; la estructura funcional en sí, nos proporcionara un tránsito cómodo a los usuarios y una superficie de rodamiento

adecuada a las necesidades de este, en su determinación o apreciación no intervendrán factores como diseño geométrico, estado de acotamientos, señalamiento.

La falla funcional en sí, consiste en deficiencias superficiales del pavimento a las que se asocian precisamente el índice de servicio, que afectan en mayor o menor grado la capacidad del camino, para proporcionar al usuario un tránsito como y seguro.

Figura 7. Pérdida de serviciabilidad en un pavimento flexible.

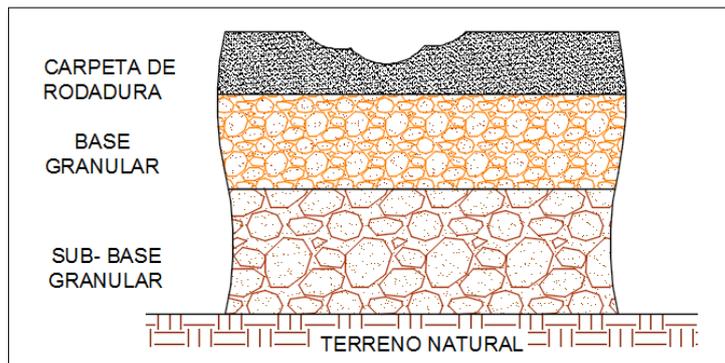


Fuente: Carahuatay

Los aspectos más importantes del pavimento que intervienen en el valor de índice de servicio actual son:

- Las ondulaciones longitudinales.
- Las deformaciones transversales.
- La textura de la superficie.
- El porcentaje de baches y áreas reparadas.

Figura 8: Falla funcional en un pavimento flexible.



Esquema típico de falla funcional.

Fuente: Carahuatay

Falla estructural

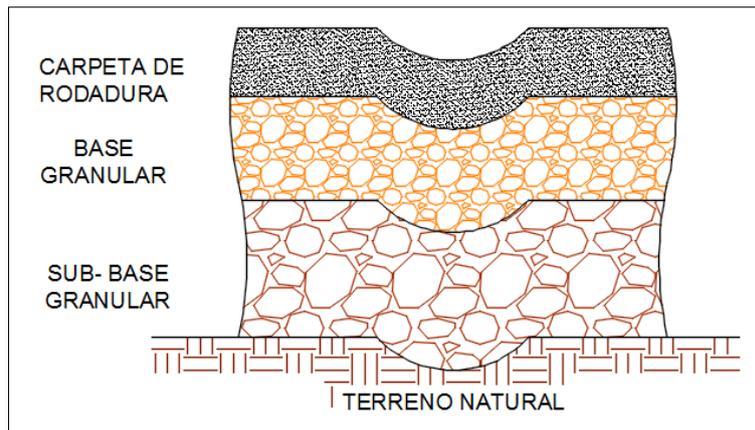
Es una deficiencia del pavimento que ocasiona, de inmediato o posteriormente, una reducción en la capacidad de carga de este. En su etapa más avanzada, la falla estructural se manifiesta en la obstrucción generalizada del pavimento.

Las fallas estructurales tienen su origen en defectos en una o más de las capas que conforman la estructura del pavimento, las cuales están destinadas a resistir y compartir los esfuerzos impuestos por el tráfico, de manera que a nivel de subrasante o suelo de fundación de pavimento lleguen los esfuerzos en menor valor y lo más distribuido posible. En estos casos la corrección de las fallas va dirigida al refuerzo de la estructura existente mediante la colocación de una capa cuyo espesor debe ser calculado en función de los requerimientos de las cargas de tráfico previstas para el nuevo periodo de tiempo de vida útil. La falla estructural se deriva de dos causas fundamentales:

- Cuando la capacidad de deformación – recuperación de los materiales que conforman la estructura de pavimento es “excedida más allá del valor que determinan las deformaciones recuperables por elasticidad instantánea y retardada, desarrollándose deformaciones permanentes (ahuellamiento) 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 que pueden provocar el colapso de la estructura”

- Cuando 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 del proceso de fisuramiento”

Figura 9. Falla estructural en un pavimento flexible.



Esquema típico de falla estructural

Fuente: Carahuatay

Las fallas las podemos clasificar tomando en cuenta el elemento estructural donde se originan:

- Fallas atribuibles a la carpeta.
- Fallas originadas en la interface, carpeta-base como consecuencia de una interacción inadecuada, esto es, un mal acoplamiento entre el material de base y la carpeta.
- Fallas originadas en la base, sub-base o terracerías, como consecuencia de la inestabilidad de una o varias de estas capas.
- Fallas originadas por la repetición de cargas.
- Fallas ocasionadas por los agentes climatológicos.

Los dos tipos de fallas no están necesariamente relacionados, pero pueden establecerse que cuando se presenta una falla estructural, también ocurrirá en un plazo más o menos corto la falla funcional. En ocasiones una falla funcional que no se atiende a su debido tiempo, puede también conducir a una falla estructural.

2.2.5. Evaluación estructural de pavimentos

La evaluación estructural de pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad resistente del sistema en una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al

fin de su vida útil o cuando el pavimento va a cambiar su función de demanda de tráfico.

En general la evaluación estructural está comprendida por la auscultación estructural y el retrocálculo, entendiéndose por auscultación estructural las técnicas de recolección de información del pavimento (deflexiones) y la segunda la aplicación de la metodología a utilizar para definir los resultados finales de la evaluación estructural.

La auscultación estructural de los pavimentos ha ido variando con el tiempo en función de los avances tecnológicos, requiriendo cada vez un mejor rendimiento de trabajo, una recolección sistemática de los parámetros del pavimento y menor daño físico y operacional al pavimento en estudio. Dentro de las mediciones realizadas en la auscultación estructural habrá que considerar los siguientes aspectos ya que pueden inducir errores al interpretar los resultados:

Temperatura: será necesario realizar ajustes en las deflexiones en base a la temperatura bajo las que se realizaron los ensayos y se observara cual es el comportamiento térmico del pavimento.

Humedad: esta afecta a las bases, subbase y Subrasante, ya que algunos de los materiales componentes de las mismas tienen una gran susceptibilidad a dicha humedad.

Tiempo de carga: esta condición tiene una gran influencia en los valores obtenidos de deflexión, por ejemplo:

- **Materiales ligados con cemento asfáltico:** están fuertemente influenciados por el tiempo de carga debido a la naturaleza visco elástica del asfalto. Este efecto se reduce a bajas temperaturas.
- **Materiales ligados con cemento hidráulico:** el módulo dinámico para materiales cementados puede ser de aproximadamente el doble del módulo estático, si el tiempo de aplicación de carga es muy alta, este efecto se reduce a medida que el módulo aumenta.
- **Suelos finos:** manifiestan mayor rigidez en respuestas a cargas dinámicas.

Con el análisis estructural se encuentran los estudios de vida remanente, capacidad estructural y rehabilitaciones. Para realizar todos estos estudios se utilizan diversos métodos, los cuales han sido orientados para predecir y solucionar fallas estructurales que ocurren en los pavimentos.

Los métodos se dividen en empírico y mecanicista empírico. Es importante que se escoja el método de evaluación estructural en base al método de diseño utilizado para entrelazar el estudio.

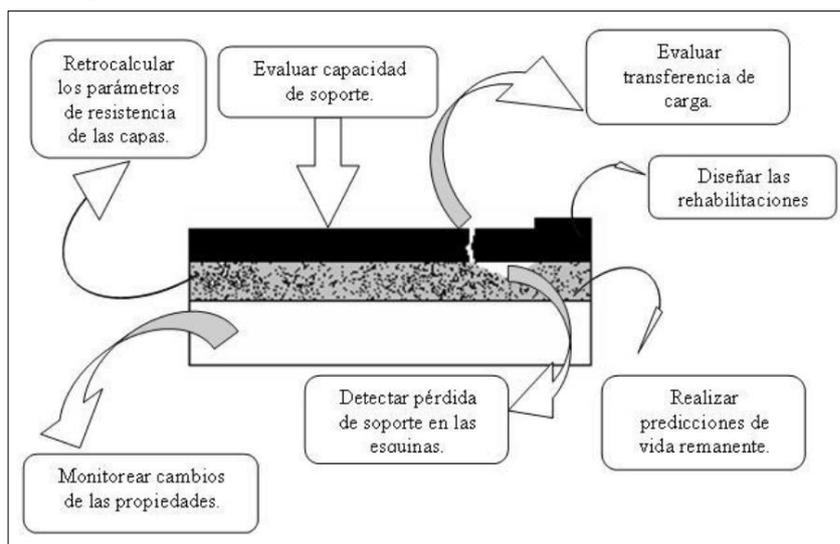
Muchos son los procedimientos empíricos que se basan en las condiciones tales como: tráfico, materiales, configuración de las capas y condiciones ambientales.

Actualmente la combinación de los métodos empíricos y mecanicistas han creado una nueva línea denominada métodos mecanicistas empíricos, en los que la parte mecanicista está dada por la respuesta estructural del pavimento en forma de tensiones, deformaciones y deflexiones, determinados a través del uso de modelos matemáticos y la parte empírica utilizada para relacionar estas respuestas con el comportamiento del pavimento in situ.

Al final, la evaluación estructural puede proveer resultados partiendo de las dos etapas importantes que lo componen como lo son la auscultación estructural y el retrocálculo (Figura 10)

Para la evaluación estructural son tan importantes las condiciones actuales del pavimento como las condiciones bajo las que se concibió el mismo, entre las que se pueden mencionar: las solicitaciones principales del pavimento, modelos de comportamiento del pavimento, métodos de evaluación estructural, etc.

Figura 10. Resultados de una evaluación estructural.



Fuente: Escobar, García, Guzmán, 2007

2.2.6. Solicitaciones principales de un pavimento.

Las sollicitaciones principales de un pavimento son el producto del tránsito y el clima. El tránsito visto como las cargas a las que está expuesto el pavimento y el clima como el agente natural del medio ambiente.

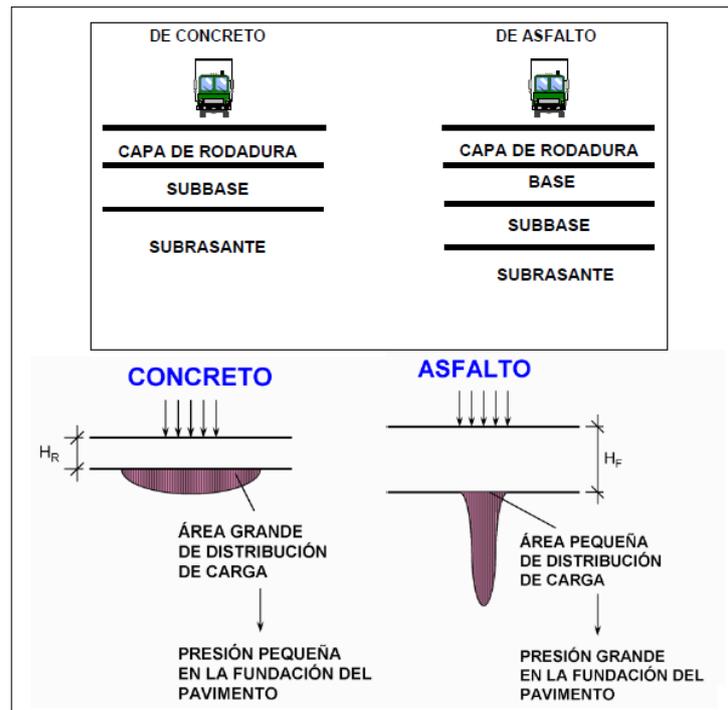
2.2.6.1 Tránsito

Se puede apreciar que el volumen de vehículos ha crecido en los últimos años, pero ese aumento ha sido aún mayor si se ve en términos de la carga que se transporta, esta situación tiene una influencia significativa en el comportamiento de los pavimentos, a la hora de determinar o predecir el daño que sufrirá un pavimento en el tiempo.

El tránsito está compuesto por diferentes vehículos, de diferentes pesos y número de ejes (ver Anexo 3). Evaluar esta diversidad es un trabajo complejo por tal razón, actualmente algunas metodologías definen la conversión del tránsito existente, proyectado o inducido en un número de ejes equivalente identificado como ESAL's, el cual consiste en el número de repeticiones de carga equivalentes a 8.2 ton. O 18 kips, durante la vida útil del pavimento.

El efecto de las cargas producidas por los vehículos en los pavimentos es la principal causa del deterioro de este, a lo cual se suma el efecto del clima, reduciendo así la capacidad del pavimento. (Figura 11.)

Figura 11: Comparación de la distribución de cargas en pavimentos.



Fuente: Instituto colombiano productores de cemento

Volumen de tránsito

- **Índice medio diario anual (IMDA)**

El Índice Medio Diario Anual (IMDA) es el valor numérico estimado del tráfico vehicular en un determinado tramo de la red vial en un año. El IMDA es el resultado de los conteos volumétricos y clasificación vehicular en campo en una semana, y un factor de corrección que estime el comportamiento anualizado del tráfico de pasajeros y mercancías.

$$\text{IMDA} = \text{IMDS} \times \text{FC}$$

Donde:

IMDS: Índice Medio Diario Semanal o Promedio de Tráfico Diario Semanal

FC: representa el Factor de Corrección Estacional

El Índice Medio Diario Semanal (IMDS) se obtiene a partir del volumen de tráfico diario registrado por tipo de vehículo en un tramo de la red vial durante 7 días.

$$\text{IMDS} = \frac{\sum Vi}{7}$$

Donde:

Vi: Volumen vehicular diario de cada uno de los 7 días de conteo volumétrico.

El Factor de Corrección Estacional (FC) es un valor numérico requerido para expandir la muestra del flujo vehicular semanal realizado a un comportamiento anualizado del tránsito. Dicho valor es proporcionado por PROVIAS NACIONAL.

- **Peso por eje de los vehículos comerciales**

En este caso, en todos los países se usa la equivalencia del tránsito a un solo tipo de Eje estándar. El más común es el propuesto por la AASHTO correspondiente a un eje de 18.000 libras de peso (18 kip, equivalente a 8.2 toneladas.)

Ecuación 1: número de repeticiones de ejes equivalentes.

$$N_{18} = N^{\circ}veh * 365 * FC * FD * Fcarr * Fca$$

Donde:

N18: Número de repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 toneladas.

N°veh= número de vehículos que transitan por la vía en un día

FC= Factor camión

Fca= Factor de crecimiento acumulado

FD= 0.5, Factor dirección

Fcarr= 1.0, Factor de carril

365: número de días del año.

- **Presión de inflado**

Con respecto a la presión de inflado de los neumáticos, la carga es transmitida del vehículo al pavimento a través de los neumáticos. Cada neumático reparte la carga que le corresponde a través de su presión de inflado, siendo ésta la presión unitaria que recibe el pavimento. La presión de inflado del neumático influye directamente a la superficie de la primera capa, siendo su efecto rápidamente disipado en ella, de manera que a las capas siguientes sólo son influenciadas por el peso total del eje cargado.

2.2.6.2 Clima

Las condiciones del medio ambiente tienen efectos sobre el comportamiento de los pavimentos rígidos y flexibles. Factores externos tales como la precipitación, temperatura y la profundidad del nivel freático juegan un papel clave para definir las limitaciones que los impactos del medio ambiente pueden tener en el comportamiento del pavimento. Factores internos tales como la susceptibilidad de los materiales de pavimento. Factores internos tales como la susceptibilidad de los materiales del pavimento para la humedad, drenabilidad en las capas de pavimento, infiltración potencial del pavimento, etc.

En la estructura de pavimento, la humedad y la temperatura son dos de las variables que pueden significativamente afectar la capa de pavimento y las propiedades de la Subrasante, y, por lo tanto, su capacidad de soportar cargas.

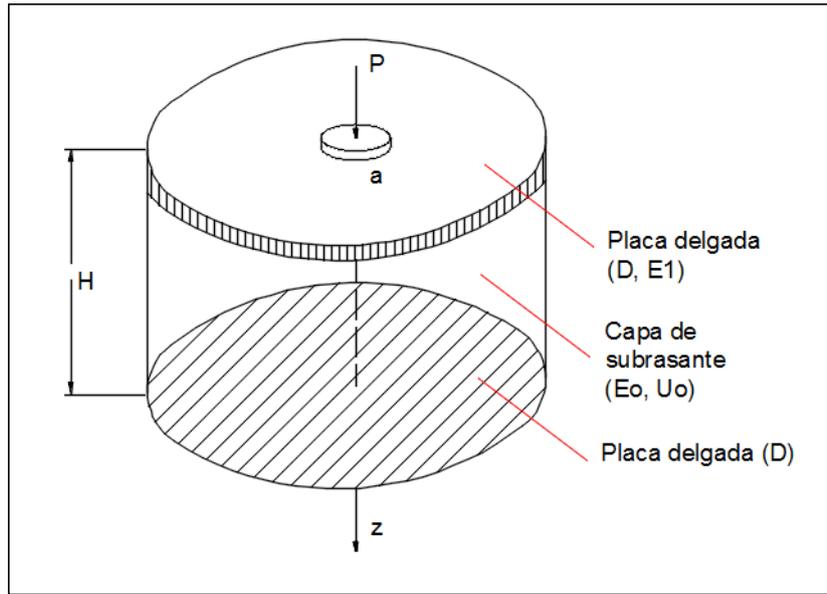
2.2.7. Modelos de comportamiento del pavimento.

Con el objeto de predecir el deterioro que puedan sufrir los pavimentos a lo largo de su vida útil, se han elaborado modelos de comportamiento. Cada modelo de comportamiento es un modelo matemático que permite predecir la posible evolución de deterioro del pavimento en la línea de tiempo, siempre y cuando se pueda definir las condiciones al momento de realizar el análisis como en la puesta de servicio del mismo.

A. Modelo de Hogg (1944)

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 12, describe la geometría y los parámetros del modelo de Hogg.

Figura 12. Modelo de comportamiento Hogg.



Fuente: Esquema de Hogg

Los parámetros que desarrolla este modelo son los siguientes:

Ecuación 1. Rigidez a la flexión de la placa

$$D = \frac{E1 * t^3}{12 * (1 - U1^2)} (t - m) \dots \dots \dots (1)$$

Ecuación 2. Longitud característica

$$Lo = \frac{D(1 + Uo)(3 - 4Uo)^{\frac{1}{3}}}{2 * (1 - Uo) * Eo} (cm) \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

Eo : módulo de elasticidad de la subrasante (kg/cm²)

Uo : módulo de poisson de la subrasante (adimensional)

H : profundidad del estrato rocoso (cm)

La expresión matemática desarrollada para el cálculo de las deformaciones en la superficie del sistema viene dada por una integral infinita de funciones Bessel y funciones angulares hiperbólicas, para el caso de una carga uniformemente distribuida circular de radio "a" tiene la siguiente forma:

Ecuación 3. Cálculo de la deformación en la superficie.

$$\Delta_{(z=0,r)} = \left(\frac{(1 + U_0)(3 - 4U_0) * p * a}{2(1 - U_0) * E_0} \right) \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{m * r}{L_0}\right) * J_1\left(\frac{m * a}{L_0}\right)}{m^4 + m * \varphi * \frac{m * h}{L_0}} dm \dots \dots \dots (3)$$

Donde U₀, E₀, p, L₀, están definidos en la figura 13, "r" es la distancia horizontal en la superficie de la placa desde el eje de carga y φ viene dada por la siguiente expresión.

Ecuación 4. Cálculo de φ de la deformación en la superficie.

$$\varphi = \frac{\sinh(m) * \cosh(m) + \frac{m}{3 - 4U_0}}{(\sinh(m))^2 - \frac{m^2}{(3 - 4U_0)^2}} \dots \dots \dots (4)$$

B. Modelo de Ahlvin y Ulery (1962)

Con el objeto de determinar el umbral a partir del cual resultan absolutamente necesarios realizar mejoramientos de la capacidad portante de la subrasante; se realizaron ensayos deflectométricos con Viga Benkelman (VB).

Para la determinación teórica de la magnitud de las deflexiones, se utilizaron las fórmulas desarrolladas por los investigadores Ahlvin y Ulery, para determinar las deflexiones verticales bajo un área circular cargada, que en este caso viene a ser el área proyectada de una llanta de camión con 80 psi de presión (equivalente a 5,64 kg/cm²), que corresponde a la presión ejercida por un eje normal equivalente.

La determinación de la magnitud de las deflexiones en la subrasante, como resultado de la sollicitación de cargas aplicadas por un eje equivalente de 8.2 toneladas, se efectuó a través de ensayos deflectométrico con la aplicación de

la VB directamente sobre la subrasante para el registro de las deflexiones resultantes.

Según los autores aludidos; la fórmula general de la deflexión vertical es la siguiente:

Ecuación 5. Cálculo de la deflexión

$$\Delta = \frac{p(1 + u)a}{E} \left[\frac{z}{a} * A + (1 - u)H \right] \dots \dots \dots (5)$$

Donde:

- Δ : Deflexión (10⁻² mm).
- P : Presión de inflad de la llanta (5.64 kg/cm²).
- a : radio de contacto (10.79 cm).
- u : Módulo de poisson. 0.45 (adimensional).
- E : módulo resiliente del terreno de fundación.
- Z : Profundidad de evaluación de los esfuerzos de compresión.

Aplicando los valores establecidos en la ecuación N° 03; para profundidad z = 0, resultan A=1.00 y H=2.00, por tanto, e tiene lo siguiente:

Tabla 7: Determinación teórica de deflexiones según Ahlvin y Ulery.

CBR	P (kg/cm ²)	E (psi)	Poisson (u)	a (cm)	Δ (1/100 mm)
9	5.64	13,500	0.45	10.79	102
8	5.64	12,000	0.45	10.79	115
7	5.64	10,500	0.45	10.79	131
6	5.64	9,000	0.45	10.79	153
5	5.64	7,500	0.45	10.79	184
4	5.64	6,000	0.45	10.79	230
3	5.64	4,500	0.45	10.79	307

Fuente: R. Oviedo, "Mejoramiento de subrasante de baja capacidad portante por medio de la aplicación de correlación deflectométrica"

Se puede evidenciar que las deflexiones del suelo natural de fundación son del orden de 102/100mm. Para un CBR de 9 % y estas deflexiones se van incrementando a medida que el CBR va disminuyendo.

2.2.8. Métodos de evaluación estructural.

Ante un problema de evaluación estructural, tradicionalmente se recurre a la perforación de calicatas, a la toma de muestras para ensayo en el laboratorio, y al análisis de cada uno de sus componentes (materiales) por separado, para incorporarlos luego al sistema denominado pavimento y deducir acerca de las características estructurales del mismo. Esta metodología es lenta y es “destructiva”.

En la actualidad se está aplicando nueva tecnología no destructiva “NDT” (non destructive test) basándose en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento. Su medición es simple, rápida, económica y lo más importante no altera el equilibrio de la estructura porque es una metodología “no destructiva”. Esta metodología se fundamenta en la información valiosa que nos presta la curva o cuenco de deflexiones para interpretar esta información de forma cuantitativa, se compara el sistema pavimento-subrasante con un modelo matemático.

Por lo tanto, se puede mencionar que la metodología NDT, basada en la interpretación de deflexiones es un proceso de diseño inverso (retrocalcula) ya que se utiliza la respuesta del sistema (Pavimento-Subrasante) para establecer sus características estructurales.

Es importante aclarar que al utilizar la metodología NDT, para la evaluación estructural de pavimentos a través de deflexiones no implica dejar de realizar ensayos destructivos como las calicatas, ya que cuando se están en presencia de evaluaciones estructurales de carreteras que no cuentan con antecedentes históricos de construcción y diseño, se procede a realizar calicatas para verificar sus dimensiones, tipos de materiales y homogeneidad de las capas que conforman el pavimento (Rojas,2003).

2.2.8.1 Métodos directos de auscultación

Los métodos directos de auscultación son métodos destructivos, que deterioran la estructura del pavimento.

El uso de los métodos directos, presentan las siguientes desventajas como la obtención de datos requiere mayor cantidad de tiempo, costos más elevados, mayores molestias en el tráfico, etc.

Entre los métodos directos de auscultación estructural utilizados en el Perú se pueden mencionar:

- Calicatas o pozos a cielo abierto: Las calicatas permiten la inspección directa del suelo que se desea estudiar y, por lo tanto, es el método de exploración que normalmente entrega la información más confiable y completa. En suelos con grava, la calicata es el único medio de exploración que puede entregar información confiable, y es un medio muy efectivo para exploración y muestreo de suelos de fundación y materiales de construcción a un costo relativamente bajo.
- Extracción de núcleos: estos ensayos, se realizan usando maquinas que cortan circularmente el pavimento, con el fin de obtener muestras, q luego serán ensayadas en un laboratorio.

(Velásquez, 2009).

2.2.8.2 Métodos indirectos de auscultación estructural

Se le puede llamar métodos indirectos de evaluación estructural, a aquellos métodos con los cuales se logra determinar la capacidad estructural del pavimento, sin tener que dañar la estructura, dichos métodos se basan en hipótesis y modelos matemáticos (Chávez, 2015).

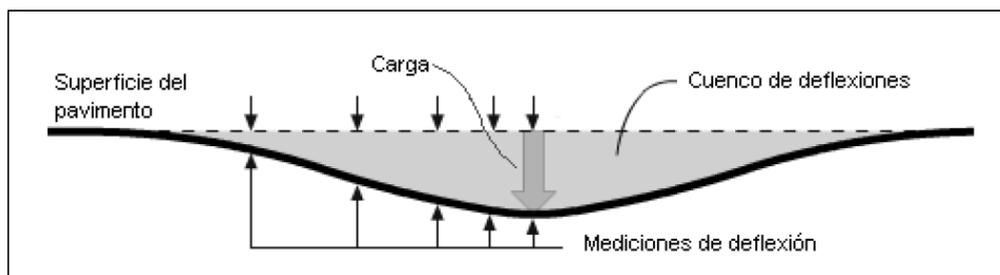
Estos métodos se realizan por medio de metodologías conocidas tales como no destructiva “NDT” (non destructive test), que se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de los pavimentos. Dicha metodología se fundamenta en que la forma y dimensión de la curva de deflexiones encierra una valiosa información acerca de las características

estructurales del pavimento y su subrasante, por lo que se puede mencionar que la metodología de evaluación estructural por medio de NDT, es un proceso de diseño inverso (retrocalcula) ya que se utiliza la respuesta del sistema (pavimento-subrasante) para establecer sus características estructurales.

Al definir el término deflexión, lo más acertado sería considerarlo como la medida de la deformación elástica que experimenta un pavimento, al paso de una carga en función del tipo y del estado del pavimento. El cuenco de deflexiones se define como el conjunto de deflexiones que se producen entre el punto de aplicación de la carga en un pavimento y sus alrededores (ver Figura 13.)

Los equipos de deflectometría pueden registrar deflexiones en diferentes puntos lo que ayuda a definir completamente la caracterización de las deformaciones conocido como cuenco de deflexiones (Chávez, 2015).

Figura 13. Esquema ideal del comportamiento del cuenco de deflexiones



Fuente: reyes Lizcano, 2003.

La caracterización del cuenco de deflexiones está basada en tres parámetros básicos, que, si bien no otorgan un estado representativo de la estructura del pavimento, sirven para generar una visión y condición de homogeneidad del proyecto.

De forma general, hay tres tipos de equipo para determinar las deflexiones del pavimento según metodologías no destructivas los cuales son:

- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas estáticas.
- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas vibratorias.
- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas de impacto.

Para cualquiera de ellos el principio es el mismo y consiste en aplicar una carga de magnitud conocida a la superficie del pavimento y medir las deflexiones (Velásquez, 2009).

A. Medición de deflexión estática o de movimiento lento.

Corresponde a la primera generación, básicamente originada con el desarrollo de la viga Benkelman. Estos equipos tipo viga, proveen la medida de deflexión en un punto, bajo una carga estática o de movimiento lento.

Los END empleados en el país en los últimos 20 años, se han ejecutado con el deflectógrafo tipo Viga Benkelman según el procedimiento canadiense Canadian-Goad Road Association (coincidente con el Instituto del Asfalto) que determina la deflexión elástica del pavimento. Este equipo determina deformaciones del pavimento frente a las solicitaciones de carga provenientes de un vehículo cargado. La Figura 14 muestra las ruedas duales de un eje trasero de un vehículo que transmite una carga de 8.2 toneladas y el equipo Viga Benkelman posicionado para efectuar las mediciones de deformaciones (Velásquez, 2009).

Figura 14. Equipo viga Benkelman instalada entre las ruedas duales del camión volquete.



Fuente: Elaboración propia

B. Medición de deflexión por cargas de impacto

Se refiere a los equipos tipo impacto como el deflectómetro de impacto (FWD) que aplican un impulso de carga de corta duración para simular el paso de una rueda móvil a alta velocidad, a través de una masa suspendida que se eleva y luego se deja caer sobre una placa que se ha situado en la superficie del pavimento. Variando el peso y la altura de caída se pueden generar diferentes magnitudes de cargas de impacto y duración, semejantes a las de una carga real del tránsito (Espinosa, 2009).

La secuencia de operación consiste en situar el equipo en el punto fijado, se baja la placa y los sensores hasta que se apoyen en la superficie y se aplica la carga o la serie de cargas previstas. Las deflexiones producidas son medidas por medio de un grupo de geófonos en unidad de micrones, distribuidos linealmente a una distancia de 30 cm entre ellos.

La deflexión medida en el punto de aplicación de la carga da el resultado de la capacidad estructural del pavimento en conjunto, mientras que la deflexión registrada por los sensores más alejados es debida a la deformación de las capas más inferiores (base, subbase y Subrasante) (Espinosa, 2009).

Figura 15: Deflectómetro de impacto (FWD).



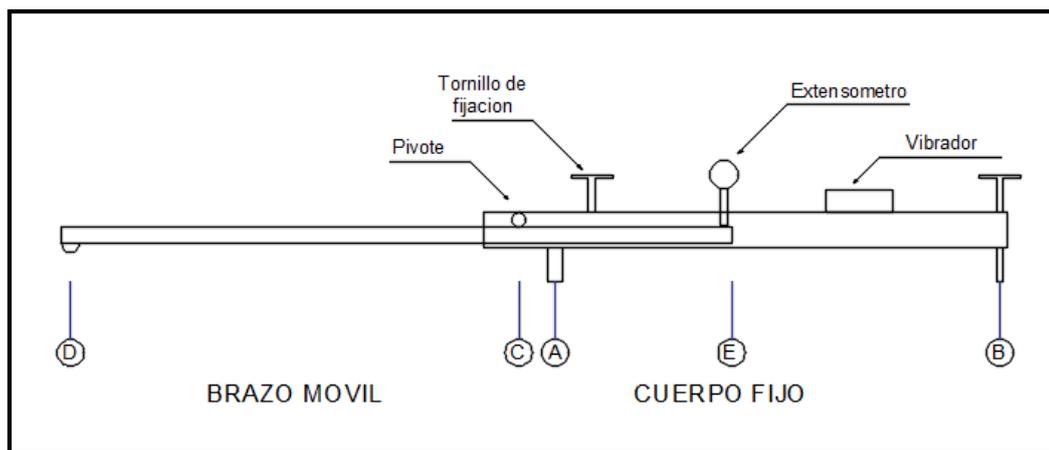
Fuente: Ignacio (2003).

2.2.9. Viga Benkelman

Llamado así en honor al Ing. A.C. Benkelman, quién la desarrollo en 1953 como parte del programa de ensayos viales de la AASHTO Road Test. Desde entonces su uso se ha difundido ampliamente en proyectos de evaluación estructural de pavimentos flexibles, tanto por su practicidad como por la naturaleza directa y objetiva de los resultados que proporciona.

La viga consta esencialmente de dos partes: un cuerpo fijo que se ubica directamente sobre el terreno mediante tres apoyos, dos delanteros fijos (A) y un tercero posterior regulable (B). Así como de un cuerpo móvil el cual consta de dos brazos móviles acoplados al cuerpo fijo a través de una articulación o pivote (C), uno de cuyos extremos se apoya sobre el terreno (D) entre las dos llantas del eje trasero, y el otro se encuentra en contacto sensible con el vástago de un extensómetro de movimiento vertical (E). Adicionalmente el equipo posee un vibrador incorporado que, al ser accionado, durante la realización de los ensayos, evita que el indicador del dial se trabe o que cualquier interferencia exterior afecte las lecturas.

Figura 16: Esquema viga Benkelman.



Fuente: Bustamante, 1996

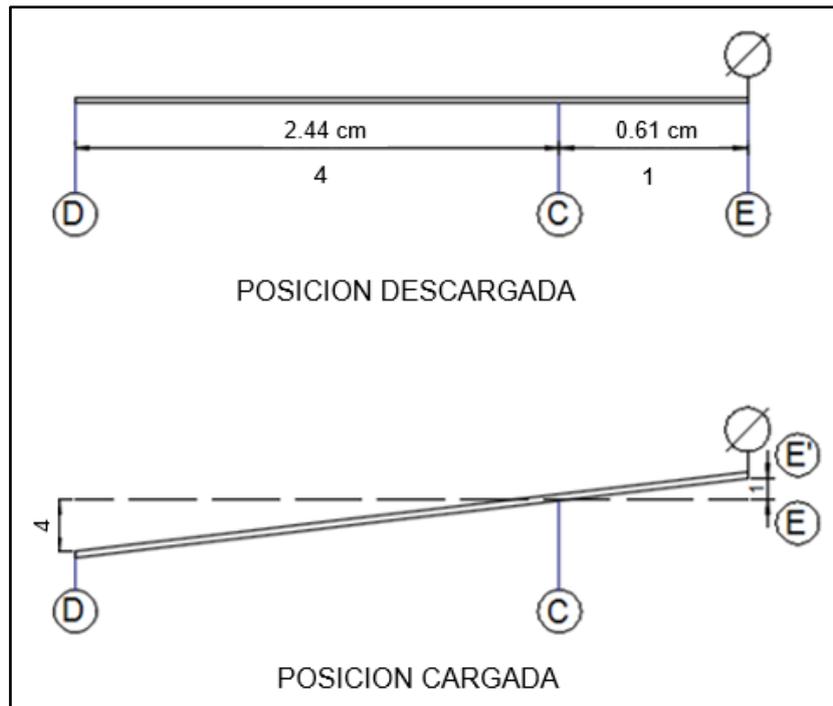
Consiste en un dispositivo sencillo que opera por medio de una palanca suspendida de un bastidor que trasmite la deflexión vertical del punto de medida a un comparador. Este equipo debe ser usado con un camión cargado, normalmente con 80 KN en un eje, con llantas duales infladas a una presión de 0.48 a 0.55 Mpa (70 a 80 Psi). Las mediciones se realizan

colocando la punta de la viga entre las dos ruedas y midiendo la deflexión cuando el vehículo se retira. Los resultados de las deflexiones se leen en un dial indicador.

✓ **El procedimiento de su uso es el siguiente:**

El extremo “D” o punta de la viga es de espesor tal que puede ser colocado entre una de las llantas dobles del eje trasero de un camión cargado. Por el peso aplicado se produce una deformación del pavimento, consecuencia de lo cual la punta baja una cierta cantidad, con respecto al nivel descargado de la superficie. Como efecto de dicha acción el brazo “DE” gira en torno al punto fijo “C”, con respecto al cuerpo “AB”, determinando que el extremo “E” produzca un movimiento vertical en el vástago del extensómetro apoyado en él, generando así una lectura en el dial indicador. Si se retiran luego las llantas cargadas, el punto “D” se recupera en lo que a deformación elástica se refiere y por el mismo mecanismo anterior se genera otra lectura en el dial del extensómetro. La operación expuesta representa el principio de medición con la Viga Benkelman. Lo que se hace después son solo cálculos en base a los datos recogidos. Así, con las lecturas obtenidas es posible determinar cuánto deflecto el pavimento en el lugar subyacente al punto “D” de la viga, durante el procedimiento descrito. Es de anotar que en realidad lo que se mide es la recuperación del punto “D” al remover la carga (rebote elástico) y no la deformación al colocar esta. Para calcular la deflexión deberá considerarse la geometría de la viga, toda vez que los valores dados por el extensómetro (EE’) no están en escala real sino que dependen de la relación de brazos existentes (Figura 17)

Figura 17. Principio de uso de viga Benkelman.



Fuente: Bustamante, 1996

Generalmente, la punta de la viga se coloca al centro del par de ruedas, se toma una lectura inicial y al retirar el camión, se toma la lectura máxima y una final del parámetro.

Este equipo de bajo costo de utilización posee dos desventajas principales: la primera el bajo rendimiento de muestreo y segundo la falta de proveer un cuenco de deflexiones.

2.2.10. Deflexiones en pavimentos

A. Cálculo de las deflexiones

Para el cálculo de las deflexiones para cada sección consiste en sustraer la lectura final (punto de referencia de deflexión cero) a cada una de las otras, las diferencias se multiplican por la relación de brazos de la viga Benkelman, en este caso 1:4, representando las respectivas diferencias la deformación en dichos puntos, las cuales en conjunto definen la curva de deflexión de superficie de pavimento.

Como las lecturas que se toman en el dial corresponden a componentes de deformación en un proceso de descarga, el valor o lectura final será menos que el inicial, en que el dato inicial es la deformación máxima y el valor final es la recuperación total.

$$D_n = (L_f - L_0) \times 4$$

Donde:

Dn: Deflexión en la medida n.

Lf: lectura en la medida final.

Ln: lectura en la medida n.

B. Corrección por temperatura

La temperatura como agente climático y ambiental en el pavimento afecta las deflexiones recuperables, de tal forma que los datos tomados en un mismo punto a diferentes temperaturas indicarán resultados diferentes, la magnitud de la deflexión aumenta con el incremento de la temperatura de las capas asfálticas, debido a la disminución de la rigidez de las mezclas bituminosas, por lo que el efecto dependerá del espesor de dichas capas y de la rigidez de las capas subyacentes.

Según el estudio CONREVIAl, para tal situación se lleva a cabo una corrección por temperatura, llevando las deflexiones de cualquier temperatura a una estándar de 20°C, para poder realizar comparaciones entre diferentes tramos, mediante la siguiente formula:

Ecuación 6. Corrección por Temperatura

$$D_{(20^{\circ}C)} = \frac{D_t}{Kx(t-20)^{xe+1}} \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

D₂₀: deflexión corregida, a la temperatura estándar de 20 °C.

D_t: deflexión medida a la temperatura "t" (1/100 mm).

K: 1x10⁻³; constante para capas granulares (1/ cm °C).

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

e: espesor de la carpeta asfáltica (cm).

C. Corrección por estacionalidad

Para una apropiada evaluación de las deflexiones se considera evaluar las deflexiones en el período más desfavorable del año, para tener en cuenta esta circunstancia existe la alternativa de establecer el factor de corrección en forma subjetiva con conocimiento del clima de la región y del comportamiento de pavimentos flexibles en ella.

La capacidad de deformación de los suelos está influenciada por el grado de saturación que experimentan, por lo tanto, es deseable que la medición de deflexiones se realice durante la estación de lluvias, durante la cual los suelos se encuentran en la situación más crítica. De no ser así, se debe efectuar la corrección de las medidas a fin de tomar en cuenta dicho aspecto. Según el estudio CONREVIAl propone el uso de los siguientes factores de corrección, considerando el tipo de suelo de subrasante y la época en que se realizaron los ensayos.

Tabla 8: Tabla de Factores de Corrección por Estacionalidad.

TIPO DE SUELO DE SUBRASANTE	ESTACIÓN LLUVIOSA	ESTACIÓN SECA
Arenosa – Permeable	1.0	1.1 a 1.3
Arcillosa – Sensible al agua	1.0	1.2 a 1.4

Fuente: Estudio CONREVIAl

2.2.11. Análisis de la capacidad estructural usando la metodología CONREVIAl.

En el estudio de CONREVIAl se ha adoptado el procedimiento canadiense, el cual es coincidente con el del Instituto del Asfalto, que determina la deflexión recuperable del pavimento, en adelante al referirse a deflexión se entenderá se trata de deflexiones recuperables.

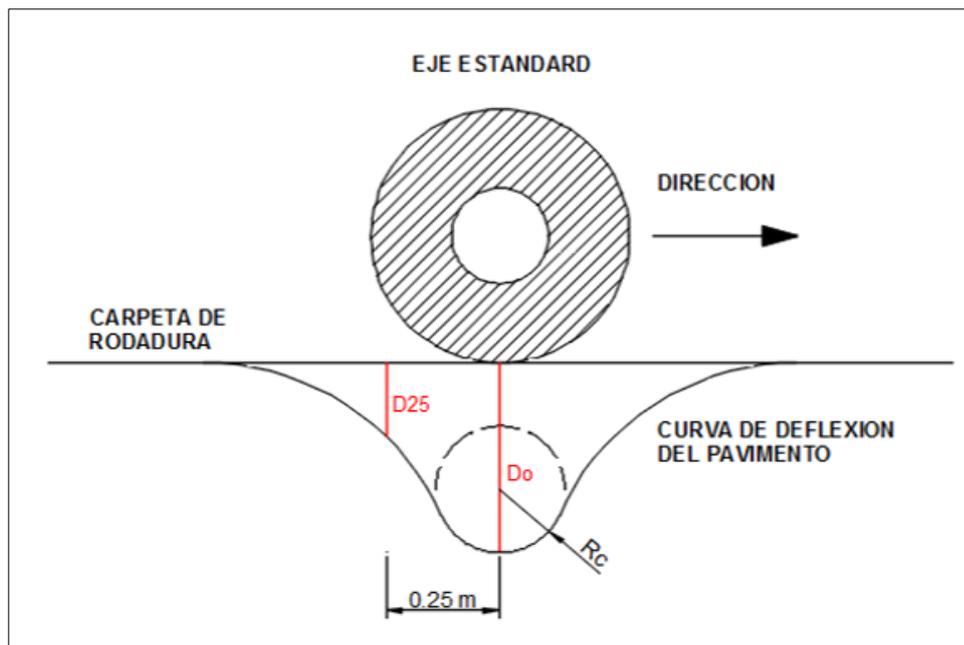
Adicionalmente se ha determinado el Radio de Curvatura, que depende directamente de la deformación por tracción y del espesor de las capas asfálticas.

A. Determinación del radio de curvatura

Las primeras tentativas para expresar numéricamente la curvatura se basaron en relacionar la Deflexión máxima con el diámetro del área superficial deformada (índice de curvatura), lo que resulta algo aleatorio por las dificultades para fijar el punto donde la línea de Deflexión es tangencial a la horizontal. El radio de curvatura de la línea elástica de Deflexión es una característica de fundamental importancia, que determina la magnitud de la deformación lineal por tracción que sufren las capas elásticas al flexionar bajo las cargas de tránsito, y en consecuencia en el desarrollo del fisuramiento en forma de piel de cocodrilo.

El método de cálculo del radio de curvatura, se basa en la hipótesis de que la línea de deflexiones de la distancia hasta el eje de carga se aproxima a una parábola hasta una distancia superior a 25cm, sufriendo luego una inflexión hasta tender asintóticamente a la horizontal. La parábola en la zona de máxima curvatura se confunde con el radio en dicho punto, es decir debajo de la acción de la carga que está flexionando el pavimento. El radio de curvatura queda definido por la siguiente relación:

Figura 18. Deformada del pavimento y parámetros de comparación.



Fuente: Reyes Lizcano, 2003

Ecuación 7. Radio de curvatura

$$Rc = \frac{10x(25)^2}{2x(D_0 - D_{25})} \dots \dots \dots (7)$$

- Rc = Radio de Curvatura en metros
- Do = Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga, en centésimas de Milímetros.
- D25 = Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga, en centésimas de Milímetros, A 25 del eje de carga.

B. Deflexión característica

Es el valor que mejor representa a un determinado sector evaluado, los datos recopilados en la evaluación deflectométrica se procesan estadísticamente considerando la distribución normal, de acuerdo a la ley de Gauss. Luego se podrá determinar la deflexión media (D), desviación estándar (δ) y el coeficiente de variación (cv), para “n” determinaciones, mediante las expresiones siguientes:

Ecuación 8. Deflexión promedio

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \dots \dots \dots (8)$$

Ecuación 9. Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{(n-1)}}, \text{ para } n > 30 \dots \dots \dots (9)$$

Ecuación 10. Coeficiente de variación

$$C_v = \frac{\sigma}{D} \times 100 \dots \dots \dots (10)$$

La “δ” corresponde a la distorsión de resultados que posean el mismo valor medio “D”, de deflexión. El valor Cv indica un mayor o menor grado de dispersión, aun para un distinto valor medio. Para realizar el diseño del refuerzo, la deflexión característica representa mejor a una determinada sección, mediante la expresión:

Ecuación 11: Deflexión característica

$$D_c = \bar{D} + t \cdot \sigma \quad \dots \dots (11)$$

Tal como muestra la tabla 2.15, el valor “t” corresponde a un porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la deflexión característica D_c .

Tabla 9: Valor de “t” y probabilidad de ocurrencia de $D > D_c$

Valor de diseño	D_c	Área $D > D_c$ %
50	D	50
75	$D + 0.674 \delta$	25
85	$D + \delta$	15
90	$D + 1.3 \delta$	10
95	$D + 1.645 \delta$	5
98	$D + 2 \delta$	2
99	$D + 2.33 \delta$	1

Fuente: Tesis “Modelación geotécnica de pavimentos flexibles con fines de análisis y diseño en el Perú”

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

En la división de carretas de california se considera trabajar con el 80% percentil, mientras que el Instituto del Asfalto recomienda usar el 98%, a lo cual le corresponde una D_c igual a $(D+2 \delta)$. El método CONREVIAl adopta un valor D_c igual a $(D+1.645 \delta)$ que corresponde al 95% de probabilidad de diseño, superada sólo por el 5% de las determinaciones efectuadas.

C. Deflexión admisible

La deflexión admisible es un parámetro definido en función al tráfico de diseño, que establece un límite para la deflexión característica por encima del cual no se garantiza un comportamiento satisfactorio de la estructura durante el periodo considerado. La expresión analítica que define este parámetro es:

Ecuación 12: Deflexión admisible

$$D_a = (1.15/N18)^{1/4} \dots \dots (12)$$

Donde:

D_a = Deflexión Admisible inicial (mm).

N18 = Número total de ejes equivalentes de 8.2 ton. Expresado en millones.

D. Deflexión crítica

La metodología del estudio de rehabilitación de carreteras en el Perú, MTC propone también una Deflexión Crítica, definida como aquella que alcanza el pavimento al término del periodo de servicio, luego de soportar el tránsito proyectado. La siguiente fórmula para determinar la Deflexión Crítica es:

Ecuación 13: Deflexión crítica

$$D_{cr} = \left(\frac{1.90}{N18}\right)^{\frac{1}{5.3}} \dots \dots (13)$$

Donde:

D_{cr} = Deflexión crítica (mm).

N18 = Número total de ejes equivalentes de 8.2 ton. Expresado en millones.

2.3. Definición de términos básicos

Pavimento. – Se define como pavimento al conjunto de capas de materiales seleccionados que se colocan sobre la subrasante debidamente acondicionada y que van a soportar las cargas del tránsito, transmitiéndolas debidamente distribuidas a las capas inferiores.

Carpeta asfáltica. – La carpeta asfáltica es la capa que se coloca en la parte superior del paquete estructural, sobre la base y es la que le proporciona la superficie de rodamiento a la vía.

Falla estructural. – Es una deficiencia del pavimento que ocasiona, de inmediato o posteriormente, una reducción en la capacidad de carga de este. En su etapa más avanzada, la falla estructural se manifiesta en la obstrucción generalizada del pavimento.

Muestra. - Es el componente más pequeño de la red vial, cada sección es subdividida en unidades de muestra para su inspección usando técnicas estadísticas de muestreo que garantizan la representatividad de la sección.

Berma. - Franja longitudinal, paralela y adyacente a la superficie de rodadura de la carretera, que sirve de confinamiento de la capa de rodadura y se utiliza como zona de seguridad para estacionamiento de vehículos en caso de emergencia.

Calzada. - Parte de la carretera destinada a la circulación de vehículos compuesta por uno o más carriles, no incluye la berma.

Carretera. - Camino para el tránsito de vehículos motorizados, de por lo menos dos ejes, con características geométricas definidas de acuerdo a las normas técnicas vigentes en el Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Carril. - Parte de la calzada destinada a la circulación de una fila de vehículos en un mismo sentido de tránsito.

Tránsito. - Actividad de personas y vehículos que circulan por una vía.

Carga. - La magnitud y duración de la carga influye considerablemente en las deflexiones de los pavimentos. Desafortunadamente, no todos los equipos comerciales que efectúan ensayos no destructivos pueden simular la carga de diseño, algunos lo hacen con la magnitud de la carga, pero no con su duración o frecuencia.

Deflexión. - La deflexión en los pavimentos es la deformación vertical bajo el punto de aplicación de la carga. La deflexión de un pavimento no es más que la respuesta del mismo ante un estímulo, en general cargas impuestas por el tráfico.

Radio de curvatura. - El grado de curvatura de la línea elástica de Deflexión es una característica de fundamental importancia, que determina la magnitud de la deformación lineal por tracción que sufren las capas elásticas al flexionarse bajo las cargas de tránsito.

Comportamiento estructural. – Es la respuesta del conjunto pavimento subrasante ante la aplicación de cargas de tránsito.

CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Periodo de estudio

La información obtenida para la presente investigación la realizamos en forma progresiva y en diferentes etapas, teniendo como base a la Universidad Nacional de Cajamarca las que fueron desarrollamos en el periodo de junio - diciembre del 2017

3.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio

El pavimento en estudio corresponde a la carretera Cajamarca - Jesús, Tramo plaza pecuaria Iscocongá - La Huaraclla, la cual es clasificada por su función como red vial terciaria o carretera de la red vial vecinal.

El punto de inicio se ubica en el lugar denominado Iscocongá (Plaza pecuaria Iscocongá).

Tabla 10: Ubicación geográfica

Punto Inicial : Km. 00 + 000 Plaza pecuaria Iscocongá.	
COORDENADAS UTM (WGS – 84)	COORDENADAS GEOGRÁFICAS
Este : 781367 m	Latitud : 7° 12' 11.62" S
Norte : 9203000 m	Longitud : 78° 27' 8.15" O
Altitud : 2,634 m.s.n.m.	Altitud : 2,634 m.s.n.m.

Fuente: Elaboración propia

Punto Final : Km. 05 + 000 Centro poblado la Huaraclla.	
COORDENADAS UTM (WGS – 84)	COORDENADAS GEOGRÁFICAS
Este : 785456 m	Latitud : 7° 13' 41.66" S
Norte : 9200278 m	Longitud : 78° 25' 1.43" O
Altitud : 2,638 m.s.n.m.	Altitud : 2,638 m.s.n.m.

Fuente: Elaboración propia

3.3. Materiales

3.3.1. Unidad de estudio

La vía en estudio es la vía asfaltada Cajamarca – Jesús, tramo desvío a Llacanora, en Iscoconga, hasta la Huaraclla.

3.3.2. Población

La población se considera toda la vía asfaltada que va desde Cajamarca hasta Jesús y viceversa.

3.3.3. Muestra

La muestra se ha considerado el tramo en el desvío a Llacanora, en Iscoconga, hasta la Huaraclla, determinándose 5 kilómetros de vía asfaltada de 6.60 metros de calzada y 0.50 metros de berma en ambos lados.

3.4. Material, Instrumentos y equipos

- ✓ **Hoja de registro de datos:** Documento donde debe registrarse la información obtenida durante el proceso de inspección.
- ✓ **GPS:** Para el levantamiento topográfico.
- ✓ **Odómetro:** Instrumento manual que permite obtener mediciones longitudinales más precisas. Debe de tener una lectura aproximada de 30mm. (Figura 19).

Figura 19. Odómetro



Fuente: elaboración propia

- ✓ **Pintura esmalte:** Para el marcado de los 26 puntos de muestras a tomar.
- ✓ **Deflectómetro Viga Benkelman:** una viga Benkelman de doble brazo con sus correspondientes diales registradores (al 0.01 mm y recorrido 12 mm). y las siguientes dimensiones fundamentales (Figura 20):
 - Longitud del primer brazo de ensayo, desde el pivote al punto de prueba =2.440 m.
 - Longitud del primer brazo de ensayo, desde el pivote al punto de apoyo del vástago de su dial registrador = 0.610 m.
 - Longitud del segundo brazo de ensayo, desde el pivote a la punta de prueba =2190 m.
 - Longitud del segundo brazo de ensayo, desde el pivote al punto de apoyo del vástago de su dial registrador = 0.5475 m.

Figura 20. Viga Benkelman



Fuente: Elaboración propia

- ✓ **Vehículo auxiliar:** para transportar al personal y equipo necesario.
- ✓ **Camión para ensayo:** el eje trasero pesará en la balanza 8175 kilogramos, igualmente distribuidos en sus ruedas duales y estará equipado con llantas de caucho y cámaras neumáticas. Las llantas deberán ser 10" x 20"; 12 lonas e infladas a 5.6kg/cm² (80 libras por pulgada cuadrada). La distancia entre los puntos medios de la banda de rodamiento de ambas llantas de cada rueda dual deberá ser de 32 cm.

Figura 21. Camión para ensayo.



Fuente: Elaboración propia

✓ **Balanza electrónica**

Figura 22. Pesaje del camión volquete (C2)



Fuente: Elaboración propia

✓ **Termómetro:**

Figura 23: Termómetro para medir la temperatura de la carpeta asfáltica.



Fuente: Elaboración propia

3.5. Metodología de la investigación

3.5.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, constructiva o utilitaria, es una investigación a nivel de estudios descriptivos por lo tanto la metodología utilizada será:

Descriptiva-aplicativa.

3.5.2. Procedimiento y técnicas de recolección de datos

- Inspección visual

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

El trabajo de campo consistió, primeramente, en una evaluación visual de toda la zona en estudio, que es el tramo de carretera km 00+000 al km 05+000 de la vía Cajamarca-Jesús, para identificar y visualizar los problemas y tipos de fallas que existen en la carretera.

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

De la evaluación visual se puede decir que los problemas a nivel de pavimento si presenta fallas notorias como son piel de cocodrilo, corrugaciones, depresiones, huecos entre otras grietas en el material asfáltico.

Todo este factor nos conlleva a realizar una evaluación deflectométrico con una viga Benkelman de doble brazo para evaluar toda la estructura del pavimento.

- **Aforo de vehículos**

La contabilización de los vehículos se los realizo en forma manual, desde el día lunes hasta el domingo, (Ver anexo 3, estudio de tránsito)

3.6. Procedimiento para medir deflexiones utilizando la viga Benkelman

La viga Benkelman de brazo doble, fue utilizada desde el año 1981, mediante el método empírico, que considera dos puntos de deflexión distantes 25 cm, y con los cuales se puede establecer la parábola de la deformada. En esta deformada se inscribe un círculo cuyo radio de curvatura (R_c) representa una longitud ficticia y mediante la interpretación de este valor, la deflexión máxima en el origen (D_o) y la deflexión característica (D_c), se tipifica la respuesta en cinco casos. De estos casos, solo uno indica que las deflexiones halladas pueden ser utilizadas para hallar los refuerzos a colocar los otros cuatro casos recomiendan el uso de métodos tradicionales, como el método AASHTO. Este proceso que demanda la recopilación de una gran cantidad de datos, puede verse desestimado al no cumplir las exigencias de los R_c , D_o y D_c . Un aspecto importante es tener en consideración el deflectograma con fines de sectorizar la carretera que se está evaluando, e inclusive no se debe tomar en cuenta los valores numéricos

obtenidos de la evaluación y por el contrario se debe tomar como curvas sectores de comportamiento estructural homogéneo.

El método usado en los ensayos realizados para este proyecto de investigación fue detallado en la Norma MTC E 1002-2000 “Medida De La Deflexión Y Determinación Del Radio De Curvatura De Un Pavimento Flexible Empleando La Viga Benkelman”. Los cuales se detallan a continuación.

3.6.1. Procedimiento

Para medir las deflexiones en la superficie del pavimento, se usará el deflectómetro conocido como la viga Benkelman, el cual es un instrumento que funciona según el principio de una palanca, uno de sus extremos se apoya en el pavimento deformado ante la aplicación de una carga, mientras que el otro está en contacto sensible con un flexímetro o Deformímetro de precisión, con dial de lecturas graduado en centésimas de milímetro. Dependiendo de la relación de brazos del equipo y de la factibilidad que el dial proporcione la verdadera magnitud de las medidas, en forma automática, se establece si es necesario corregir o no las lecturas.

La carga de ensayos del orden de 18,000 libras o 8.2 ton, las proporciona el eje posterior simple de llanta doble de un camión. La presión de inflado de las llantas debe verificarse en 80 psi (5.6 kg/cm²).

Eventualmente la carga usada en los ensayos puede tener una variación en el orden de 1%.

- I. El punto del pavimento a ser ensayado, deberá 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 utilizar las distancias indicadas en la siguiente tabla (ver Tabla 11).

Tabla 11. Tabla de distancias para ensayos.

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

Fuente: MTC E 1002 – 2000

Para nuestro estudio, el ensayo lo realizamos a una distancia de 0.75 m del borde del pavimento, puesto que el ancho del carril de la vía es 3.30 m.

Figura 24. Marcado de la vía, para la toma de datos.

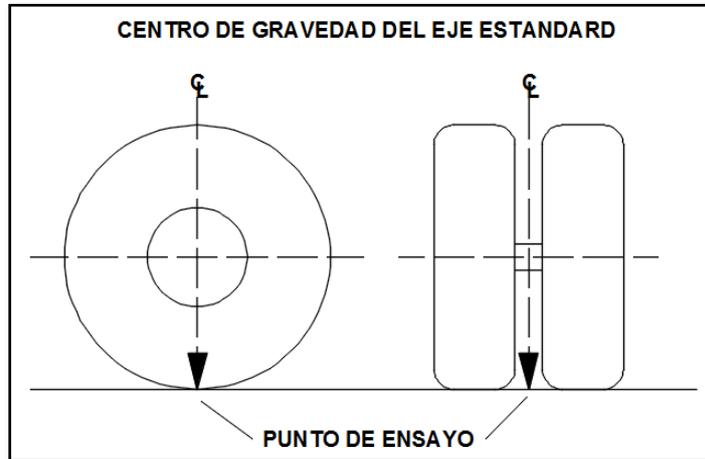


Fuente: Elaboración propia

- II. La rueda dual externa deberá ser colocada sobre el punto seleccionado, quedando este ubicado entre ambas llantas. Para la correcta ubicación de la misma es conveniente colocar en la parte trasera externa del camión una guía vertical en correspondencia con el eje de carga; desplazando suavemente el camión, se hace coincidir la guía vertical con la línea transversal indicada en el paso número I, de modo que simultáneamente el punto que entre ambas llantas de la rueda dual y que coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto

(ver Figura 25). para toda esta operación es aceptable una tolerancia en el rango de 3" alrededor del punto.

Figura 25. Ubicación del centro de gravedad del eje posterior.

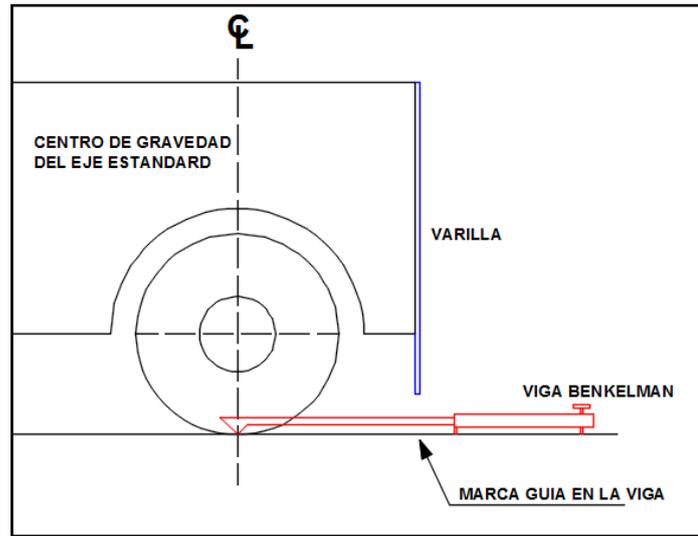


Fuente: García Espinosa 2009

- III. Se coloca la viga sobre el pavimento, detrás del camión, perpendicularmente al eje de carga, de modo que la punta de prueba del brazo móvil (del primer brazo de mayor longitud, el caso sea doble) coincida con el punto de ensayo y la viga no roce contra las cubiertas de las llantas de la rueda dual. Dado que eso último se dificulta por la inaccesibilidad tanto visual como manual, se realizará previamente la siguiente operación:

Se coloca la viga en la posición como estuviera entre las llantas pero en la parte exterior de las mismas, haciendo coincidir igualmente, haciendo uso de una plomada, el extremo del brazo móvil con el eje vertical del centro de gravedad, tomando como punto de referencia la varilla vertical adosada a la parte trasera del camión (ver Figura 26), se efectúa una marca en la viga de manera tal que, en adelante, basta con hacerlas coincidir para asegurarse que el extremo de la viga coincide con el centro de las llantas, en el momento de iniciar las mediciones.

Figura 26. Alineamiento del extremo de la viga Benkelman con el centro de las llantas con el centro de las llantas



Fuente: García Espinosa 2009

De igual forma se puede efectuar, a partir de la primera, sucesivas marcas a distancias elegidas a las cuales se desee medir deflexiones adicionales (puede ser a 25, 50, 75 y 100 cm) o por lo menos 3 lecturas, pero se pueden obtener más, con fines de verificación, lo cual es recomendable, o si es que se desea obtener una idea grafica del tipo de curva de deflexiones que se producen.

Figura 27: División de la viga Benkelman en secciones de 25cm, para la toma de mediciones.



Fuente: Elaboración propia

- IV.** Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la guía vertical y la marca inicial, se verificará que esta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión.

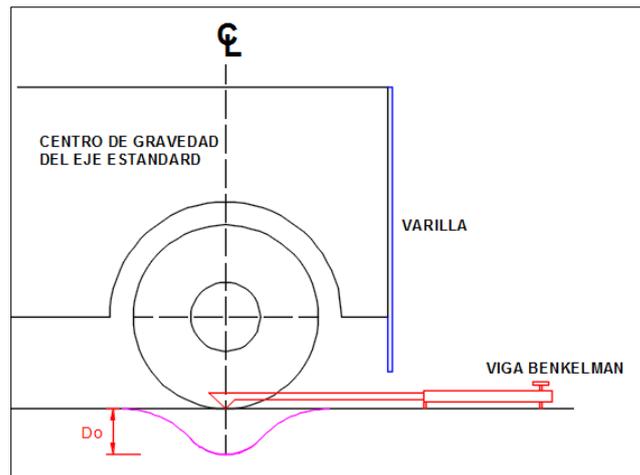
- V.** Se retira o liberan los seguros del o brazos móviles y se ajusta la base de la viga por medio del tornillo trasero, de manera que el o los brazos móviles de medición quede en contacto con el vástago del o los diales.

- VI.** Se ajusta el dial de modo que su vástago tenga un recorrido libre entre 4 y 6 mm (4 o 6 vueltas). Se gira la esfera del dial del extensómetro, hasta que la aguja quede en cero y se verificara la lectura golpeando suavemente con un lápiz y poniendo en marcha el vibrador de la viga. Girar la esfera si es necesario y repetir la operación hasta obtener la posición cero (0).

El ensayo comenzara cuando se compruebe que dicha lectura permanece constante, asegurando el equilibrio del pavimento bajo carga. Se da por estabilizada la deformación producida por la carga, cuando la lectura inicial varía en 0.01 mm/minuto o menos.

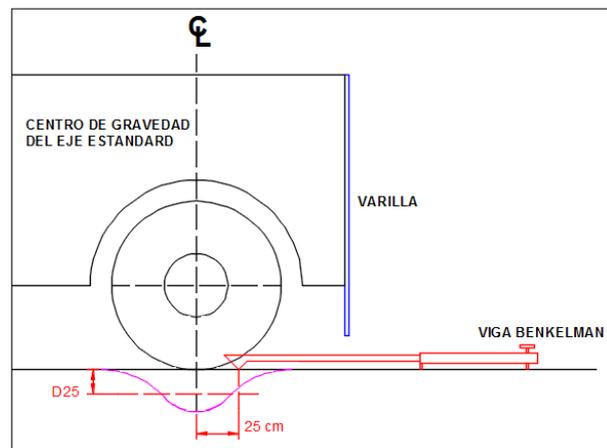
Establecida la lectura inicial en cero, se hace avanzar el camión suavemente a una velocidad de 1 km/h, procediéndose a tomar las lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con la primera, segunda y demás marcas adicionales (Figura 28.), y una lectura final cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo hasta una distancia de 8 metros. Aproximadamente en que el indicador del dial ya no tenga movimiento, registro que corresponde al punto de referencia con deflexión cero.

Figura 28 a. Posición inicial (D_0 = Deflexión máxima).



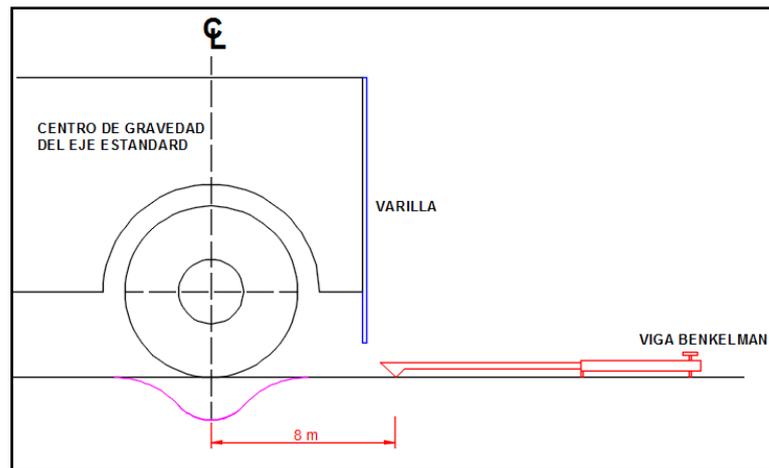
Fuente: García Espinosa 2009

Figura 28 b. Posición a 25cm (D_{25}).



Fuente: García Espinosa 2009

Figura 29:c. Posición final ($D = 0$).



Fuente: García Espinosa 2009

VII. Con el fin de medir la temperatura del pavimento se practica un orificio (antes de comenzar el ensayo y simultáneamente con el trazado de la línea) cuyas dimensiones serán: 4 cm de profundidad y 10 mm de diámetro, aproximadamente emplazado sobre la línea demarcada entre el punto de medición y el borde del pavimento.

Se llena con agua el orificio y, una vez pasada el tiempo prudencial para que el líquido adquiera la temperatura del pavimento (no menos de 10 minutos), se inserta el termómetro y se lee la temperatura antes del desplazamiento del camión.

VIII. Para detectar deformación plástica entre los neumáticos de la rueda dual del camión o verificación del descenso de las patas de la viga se procede según lo dispuesto en la norma o especificación MTC E 1002-2000, el cual se adjunta en los anexos.

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

Todo el trabajo será supervisado por un ingeniero de campo quien verificara los valores que se hayan obtenido, así como tomará anotación de cualquier factor que a su juicio pueda explicar los resultados.

3.7. Formatos de inspección.

Formatos para tomar datos con la viga Benkelman

Carretera								
Tramo		Carril						
Carga por eje		Operador						
Presión de inflado		Fecha						
Muestra	Progresiva Km	Pavimento (T°)	Lecturas (x10 ⁻²)mm/ Deformímetro					Observaciones
			Inicial (0m)	0.25	0.5	0.75	Final	

Fuente: elaboración propia

3.8. Tratamiento, análisis de datos y presentación de resultados

Se realizó para la carretera: Cajamarca-Jesús

Tramo: desvío a Llacanora-La Huaraclla (km 00+00 al km 05+00)

Ensayo: 1

Carril: Derecho

A. Presentación de las mediciones efectuadas en campo

Tabla 12: Lecturas de las diferentes Unidades de muestras Evaluadas

Muestra	Progresiva (Km)	Temperatura pavimento (°C)	Lecturas (x10 ⁻²)mm/ Deformímetro				
			Inicial (0m)	0.25	0.5	0.75	Final
01	00+050	25	100	97	94	91	88
02	00+200	27	100	96	87.5	86	84.5
03	00+400	29	100	95	90	87.5	85
04	00+600	29	100	95	87	84.5	83
05	00+800	29	100	90	85	84	82.8
06	01+000	32	100	96	87	85.3	82
07	01+200	32	100	93.8	90	88	84
08	01+400	32	100	90	86	84	80
09	01+600	33	100	94.5	87.8	84	83
10	01+800	33	100	93	86	83	80
11	02+000	33	100	91	87.5	85	82
12	02+200	33	100	89	83	81	79
13	02+400	33	100	92	87	92	86.5
14	02+600	31	100	93	83	80	79
15	02+800	31	100	89	83.5	80	71
16	03+000	31	100	96.5	91	89	78
17	03+200	30	100	94	87	83.8	81
18	03+400	30	100	91	85	83	80.5
19	03+600	30	100	85	83.5	80	79.3
20	03+800	30	100	95	89	87	84.5
21	04+000	30	100	97.5	91	89	88
22	04+200	30	100	97	94	93	89
23	04+400	30	100	96	92	90	86
24	04+600	30	100	97.5	89	87	84.2
25	04+800	30	100	96	91	89	84.8
26	05+000	30	100	97	93	91	87

Fuente: Elaboración propia

B. Deflexiones corregidas

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

- ✓ Las diferencias se multiplican por la relación de brazos de la viga Benkelman, en este caso será de 1:4, (corrección por relación de brazos de la viga).
- ✓ Estas serán corregidas por temperatura, llevándolas a una temperatura base de 20 °C, según la sugerencia del estudio CONREVIAl.
- ✓ La corrección por estacionalidad fue analizada de acuerdo a la tabla 12, donde hemos considerado tomar el valor 1.3, para una subrasante arcillosa sensible al agua y una estación seca.

Considerando estas combinaciones de corrección por temperatura y estacionalidad, deducimos la siguiente ecuación:

$$D_{20} = (1.3 \times D_t) / ((k (t^\circ - 20^\circ) * e) + 1)$$

Tabla 13. Deflexiones corregidas, km 00+000 - km 01+000.

PROGRESI VA (km)	Espesor Carpeta (cm)	Deflexiones Corregidas (x 10 ⁻²) mm				
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D _{final}
00+050	5.00	61	46	30	15	0
00+200	5.00	78	58	15	8	0
00+400	5.00	75	50	25	12	0
00+600	5.00	85	60	20	7	0
00+800	5.00	86	36	11	6	0
01+000	5.00	88	69	25	16	0

Fuente: Elaboración propia.

3.9. Análisis de los resultados usando la metodología CONREVIAl.

Par la presente evaluación se ha adoptado el procedimiento canadiense que coincide con el del Instituto del Asfalto, los cuales determinan la Deflexión Recuperable del Pavimento. Adicionalmente se ha determinado el Radio de Curvatura, que depende directamente de la deformación por tracción y del espesor de las capas asfálticas.

3.9.1. Radio de curvatura

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

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

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

$$Rc = \frac{10x(25)^2}{2x(D_0 - D_{25})}$$

Donde:

RC: Radio de curvatura.

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

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

3.9.2. Análisis de los radios de curvatura

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

En principio, las grandes deflexiones podrían estar simplemente producidas por deficiencias de calidad de las capas inferiores del pavimento, en especial de la subrasante, pero no siempre es lo que parece, sin embargo, la situación se vuelve más clara cuando se evalúa en conjunto la deflexión con el radio de

curvatura, más o menos de acuerdo con los siguientes casos (Madruga Ferreira, 2007):

a) Baja deflexión y grandes radios de curvatura

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

b) Baja deflexión y pequeños radios de curvatura

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

c) Altas deflexiones y grandes radios de curvatura

En principio, en el caso se presentan grandes deflexiones en las capas subyacentes que es donde debe estar concentrado el problema de deficiencia en la calidad de materiales o humedad excesiva, independientemente de la calidad de los materiales de las capas superiores que puedan tener calidad satisfactoria o no.

d) Altas deflexiones y pequeños radios de curvatura

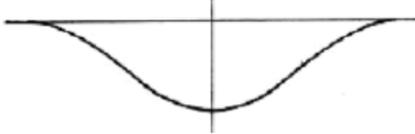
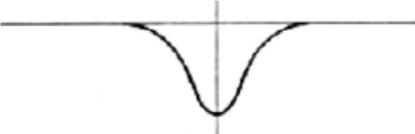
El suelo será totalmente deficiente, no cumplirá con los requerimientos de calidad tanto en las capas superiores como inferiores, está construido con materiales inadecuados y/o las capas han sido deficientemente compactadas, y/o las condiciones de drenaje son insatisfactorias.

3.10. Criterios de evaluación estructural del pavimento

Dentro de la metodología de la viga Benkelman existen valores característicos de deflexiones en pavimento, como las deflexiones medidas en los ensayos (Do) y la rigidez relativa (Lo) entre un pavimento y su Subrasante, los cuales se

pueden utilizar para establecer relaciones cualitativas entre las características de la curva de deflexiones y el sistema Pavimento-Subrasante.

Figura 29. Características del pavimento de acuerdo al cuenco de deflexiones.

Tipo	Cuenco de deflexiones	Curva medida	Pavimento evaluado
I		Curva extensa Poco Profunda	Buen Pavimento Buena Subrasante
II		Curva extensa Profunda	Buen Pavimento Mala Subrasante
III		Curva corta Poco Profunda	Mal Pavimento Buena Subrasante
IV		Curva corta Profunda	Mal Pavimento Mala Subrasante

Fuente: método CONREVIAL

De acuerdo a los tipos de deflexiones antes mostrados se obtendrán el siguiente análisis:

Tabla 14. Características del Pavimento de acuerdo al Tipo de Deflexión y Radio de Curvatura.

Tipo de Deflexión	Comportamiento de la Subrasante	Comportamiento del Pavimento
Tipo I	Bueno $D < D_a$	Bueno $R_o > 100$
Tipo II	Malo $D > D_a$	Bueno $R_o > 100$
Tipo III	Bueno $D < D_a$	Malo $R_o < 100$
Tipo IV	Malo $D > D_a$	Malo $R_o < 100$

Fuente: Método CONREVIAL

Estos diferentes tipos de modelos de deformación se interpretan de la siguiente manera:

- Tipo I: Estos modelos de deformación poseen un buen comportamiento estructural de subrasante y un buen comportamiento estructural del pavimento, ya que presentan un radio de curvatura mediana y una deflexión pequeña. Esto debido a que presentan un pavimento con sus capas en regular estado de deterioro, además de una subrasante que posee materiales que cumplen con la calidad solicitada.
- Tipo II: Estos modelos de deformación poseen un mal comportamiento estructural de subrasante y un buen comportamiento estructural del pavimento, ya que presentan un radio de curvatura mediana y una deflexión grande. Esto debido a que presentan un pavimento con sus capas en regular estado de deterioro, Pero una subrasante que posee materiales que no cumplen con la calidad solicitada.
- Tipo III: Estos modelos de deformación poseen un buen comportamiento estructural de subrasante y un mal comportamiento estructural del pavimento, ya que presentan un radio de curvatura pequeño y una deflexión pequeña. Esto debido a un espesor de las capas del pavimento insuficientes o un alto grado de deterioro de dichas capas, las cuales ya no cumplen con los estándares de calidad solicitados (en granulometría, compactación, CBR, etc.).
- Tipo IV: Estos modelos de deformación poseen un mal comportamiento estructural de subrasante y un mal comportamiento estructural del pavimento, ya que presentan un radio de curvatura pequeño y una deflexión grande. Esto debido a un espesor de las capas del pavimento insuficientes o un alto grado de deterioro de dichas capas, además de una subrasante que posee materiales inadecuados con un bajo CBR, así como deficiencia en el grado de compactación y/o mal drenaje.

Para el siguiente proyecto de investigación se ha tomado en cuenta los criterios de evaluación propuestos por el DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), evaluación estructural de pavimentos flexibles. Los cuales son presentados en la tabla 15.

Tabla 15: Criterios para la Evaluación Estructural de Pavimentos.

Hipótesis	Datos Deflectométrico Obtenidos	Calidad Estructural	Necesidad de Estudios Complementarios	Criterio de Cálculo para Refuerzo	Medidas Correctivas
I	$D_p \leq D_{adm}$ $R_c \geq 100$	Buena	No		Solo Correcciones de Superficie
II	$D_p > D_{adm}$ $R_c \geq 100$	Si $D_p < 3D_{adm}$ Regular	No	Deflectométrico	Refuerzo
		Si $D_p > 3D_{adm}$ Mala	Si	Deflectométrico, Resistencia	Refuerzo o Reconstrucción
III	$D_p \leq D_{adm}$ $R_c < 100$	Regular a Mala	Si	Resistencia	Refuerzo o Reconstrucción
IV	$D_p < D_{adm}$ $R_c < 100$	Mala	Si	Resistencia	Refuerzo o Reconstrucción
V		Mala El Pavimento presenta IGG > 180	Si	Resistencia	Reconstrucción

Fuente: DNER

CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Información preliminar

De acuerdo a nuestro esquema de investigación se da una explicación general de la zona en estudio correspondiente a la carretera Cajamarca - Jesús, Tramo Dv. A Llacanora – La Huaraclla, donde se llevó a cabo la inspección y reconocimiento del tramo en estudio con el fin de ver las características de tránsito de la carretera, su importancia y su influencia sobre el desarrollo de la región.

4.2. Antecedentes

La carretera Cajamarca - Jesús, Tramo Dv. A Llacanora – La Huaraclla, fue construida en el año 2011 – 2012. Este proyecto consistió en el asfaltado de 10 kilómetros más 90 metros de carretera, desde el desvío a Llacanora, en la plaza pecuaria Iscocongá hasta el distrito de Jesús. Utilizando un tratamiento de bicapa en dos carriles y ancho de calzada de 6.60 metros (ver secciones típicas del Anexo 4).

4.3. Carga de tránsito

Las cargas de tránsito hacen referencia a las tensiones producidas por solicitaciones externas debido al flujo o circulación constante de vehículos en una calle o avenida. Todo pavimento debe ser diseñado para resistir una determinada carga de tránsito, ya que, de lo contrario, la pista sufrirá daños permanentes, pues soportarían cargas mucho mayores a las esperadas.

Es por esto, que es de suma importancia conocer el tipo de vehículos que van a transitar en una determinada vía. Para nuestro caso, los vehículos que recorren la Carretera Cajamarca – Jesús, y sobre todo en el tramo, desvío a Llacanora-Jesús son los siguientes: motos lineales, automóviles, camionetas, combis, buses, camiones (volquetes) y camiones articulados. Estos últimos son los que van a ejercer mayor influencia en el deterioro del pavimento.

El flujo vehicular en la red de pavimento es constante, es decir, no hay variaciones significativas del tránsito. Se puede considerar que, en todo el recorrido de la vía, el tráfico es el mismo.

4.4. Aplicación del método para mediciones de deformaciones en pavimentos

Se detalla la metodología aplicada para el caso particular de la carretera Cajamarca – Jesús, Tramo Dv. a Llacanora – la Huaraclla, siguiendo los lineamientos definidos por el AASHTO T256-01. “Método Estándar de Prueba para las Mediciones de Deformación en Pavimento” y ASTM D4695 – “Guía Estándar para las Mediciones de Deformación del Pavimento en General”.

4.5. Muestreo y unidades de muestra

El muestreo se llevó a cabo para un Nivel de Proyecto General. Este nivel de pruebas proporciona un análisis más detallado del pavimento, por ejemplo, para el propósito de diseño de rehabilitación. Las pruebas deben realizarse en un intervalo de 50 m hasta 200 m, dependiendo de las condiciones del pavimento es recomendable la toma de 15 pruebas mínimo.

(Fuente: Norma, ASTM. D4695 – “Guía Estándar para las Mediciones de Deformación del Pavimento en General”, p. 3)

Para nuestro caso se realizaron los ensayos cada 200 m, ubicados a 75 centímetros del borde del pavimento, Evitando las zonas en donde se ha perdido total o parcialmente la capa de rodadura, debido a que estas zonas ya presentan una falla funcional, por lo que no se distribuirán apropiadamente las deformaciones y los esfuerzos, ver tabla **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**¹⁶.

Tabla 16: Unidades de muestra a evaluar

Unidades de muestra a evaluar			
Muestra	Progresiva (Km)	Longitud (m)	Ancho de calzada (m)
01	00+050	050.00	6.60
02	00+200	150.00	6.60
03	00+400	200.00	6.60
04	00+600	200.00	6.60
05	00+800	200.00	6.60
06	01+000	200.00	6.60
07	01+200	200.00	6.60
08	01+400	200.00	6.60
09	01+600	200.00	6.60
10	01+800	200.00	6.60
11	02+000	200.00	6.60
12	02+200	200.00	6.60
13	02+400	200.00	6.60
14	02+600	200.00	6.60
15	02+800	200.00	6.60
16	03+000	200.00	6.60
17	03+200	200.00	6.60
18	03+400	200.00	6.60
19	03+600	200.00	6.60
20	03+800	200.00	6.60
21	04+000	200.00	6.60
22	04+200	200.00	6.60
23	04+400	200.00	6.60
24	04+600	200.00	6.60
25	04+800	200.00	6.60
26	05+000	200.00	6.60

Fuente: elaboración propia

4.6. Procedimiento de inspección

Cada unidad de inspección estuvo regida de acuerdo a los procedimientos establecidos en la norma técnica ASTM – D 4695, sección 8.4 “Procedimiento de las mediciones de deformación”.

Evitando las zonas en donde se ha perdido total o parcialmente la capa de rodadura, debido a que estas zonas ya presentan una falla funcional, por lo que no se distribuirán apropiadamente las deformaciones.

Los cuales se detallan a continuación.

- Registramos la distancia entre unidades de muestra, medido con el odómetro (de 200.00 metros de longitud).
- Posteriormente se registró el tramo y número de sección, así como el número de unidad de muestra. Ubicado a 0.75 m del borde del pavimento.
- Calibrar el deflectómetro a usar en el ensayo.
- Transportar la viga Benkelman y el camión de ensayo a la ubicación de prueba.
- Se tomó la medida de la temperatura del pavimento
- Posicionar la viga Benkelman de modo que el aguilón del brazo móvil de la viga se ubique entre los neumáticos de una de las ruedas duales del eje trasero del camión.
- Liberar los tornillos de fijación de los brazos móviles de la viga y encender el vibrador de la viga, para luego ajustar el dial del extensómetro en 0.000 mm, para empezar la secuencia de prueba.
- Desplace el camión de prueba a una velocidad de 1 km/h, una distancia de 8m.
- Se repitió este procedimiento para cada unidad de muestra a ser inspeccionada.

4.7. Determinación de las deflexiones en el pavimento

Se tomaron 26 puntos de ensayo en la vía separados aproximadamente 200 m, ampliándose más esta distancia en zonas de gran deterioro del paquete estructural.

Se usó un Vehículo tipo camión, el cual poseía un peso de 8.200 Ton en el eje posterior, y una presión de inflado de sus llantas de 80 PSI, cumpliendo así con el peso estipulado en la Norma ASTM 4695.

A continuación, el análisis de datos de campo obtenidos durante la toma de Deflexiones en la Carretera Cajamarca-Jesús, tramo Dv a Llacanora-la Huaraclla.

Unidad de muestra U-01

El procesamiento y análisis de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 17. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 00+050				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
01	25	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformímetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	97	94	91	88

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-88)x4=48	(97-88)x4=36	(94-88)x4=24	(91-88)x4=12	(88-88)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (25^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2683$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 48 \times 1.2683 = 61$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 36 \times 1.2683 = 46$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 24 \times 1.2683 = 30$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 12 \times 1.2683 = 15$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
61	46	30	15	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (61 - 46)) = 208.3$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-02

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 18. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 00+200				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
02	27	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	96	87.5	86	84.5

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-84.5)x4=62	(96-84.5)x4=46	(87.5-84.5)x4=12	(86-84.5)x4=6	(84.5-84.5)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (27^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2560$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 62 \times 1.2560 = 78$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 46 \times 1.2560 = 58$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 12 \times 1.2560 = 15$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 6 \times 1.2560 = 8$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
78	58	15	8	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (78 - 58)) = 156.3$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-03

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 19. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 00+400				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
03	29	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	95	90	87.5	85

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-85)x4=60	(95-85)x4=40	(90-85)x4=20	(87.5-85)x4=10	(85-85)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (29^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2440$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 60 \times 1.2440 = 75$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 40 \times 1.2440 = 50$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 20 \times 1.2440 = 25$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 10 \times 1.2440 = 12$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
75	50	25	12	

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (75 - 50)) = 125$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-04

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 20: Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 00+600				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
04	29	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	95	87	84.5	83

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-83)x4=68	(95-83)x4=48	(87-83)x4=16	(84.5-83)x4=6	(83-83)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (29^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2440$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 68 \times 1.2440 = 85$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 48 \times 1.2440 = 60$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 16 \times 1.2440 = 20$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 6 \times 1.2440 = 7$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
85	60	20	7	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (85 - 60)) = 125$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-05

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 21. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 00+800				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
05	29	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	90	85	84	82.8

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-82.8)x4=68.8	(90-82.8)x4=28.8	(85-82.8)x4=8.8	(84-82.8)x4=4.8	(82.8-82.8)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (29^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2440$
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 68.8 \times 1.2440 = 86$
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 28.8 \times 1.2440 = 36$
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 8.8 \times 1.2440 = 11$
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 4.8 \times 1.2440 = 6$

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
86	36	11	6	0

Radio de curvatura (m)
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (86 - 36)) = 62.5$

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-06

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 22. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 01+000				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
06	32	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	96	87	85.3	82

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-82)x4=72	(96-82)x4=56	(87-82)x4=20	(85.3-82)x4=13.2	(82-82)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (32^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2264$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 72 \times 1.2264 = 88$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 56 \times 1.2264 = 69$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 20 \times 1.2264 = 25$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 13.2 \times 1.2264 = 16$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
88	69	25	16	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (88 - 69)) = 164.5$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-07

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 23. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 01+200				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
07	32	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	93.8	90	88	84

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-84)x4=64	(93.8-84)x4=39.2	(90-84)x4=24	(88-84)x4=16	(84-84)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (32^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2264$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 64 \times 1.2264 = 78$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 39.2 \times 1.2264 = 48$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 24 \times 1.2264 = 29$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 16 \times 1.2264 = 20$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
78	48	29	20	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (78 - 48)) = 104.2$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-08

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 24. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 01+400				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
08	32	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	90	86	84	80

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-80)x4=80	(90-80)x4=40	(86-80)x4=24	(84-80)x4=16	(80-80)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (32^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2264$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 80 \times 1.2264 = 98$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 40 \times 1.2264 = 49$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 24 \times 1.2264 = 29$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 16 \times 1.2264 = 20$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
98	49	29	20	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (98 - 49)) = 63.8$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-09

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 25. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 01+600				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
09	33	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	94.5	87.8	84	83

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-83)x4=68	(94.5-83)x4=46	(87.8-83)x4=19.2	(84-83)x4=4	(83-83)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (33^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2207$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 68 \times 1.2207 = 83$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 46 \times 1.2207 = 56$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 19.2 \times 1.2207 = 23$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 4 \times 1.2207 = 5$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
83	56	23	5	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (83 - 56)) = 115.7$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-10

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 26. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 10+800				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
10	33	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	93	86	83	80

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-80)x4=80	(93-80)x4=52	(86-80)x4=24	(83-80)x4=12	(80-80)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (33^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2207$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 80 \times 1.2207 = 98$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 52 \times 1.2207 = 63$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 24 \times 1.2207 = 29$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 12 \times 1.2207 = 15$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
98	63	29	15	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (98 - 63)) = 89.3$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-11

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 27. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 02+000				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
11	33	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	91	87.5	85	82

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-82)x4=72	(91-82)x4=36	(87.5-82)x4=22	(85-82)x4=12	(82-82)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (33^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2207$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 72 \times 1.2207 = 88$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 36 \times 1.2207 = 44$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 22 \times 1.2207 = 27$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 12 \times 1.2207 = 15$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
88	44	27	15	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (88 - 44)) = 71.0$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-12

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 28. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 02+200				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
12	33	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	89	83	81	79

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-79)x4=84	(89-79)x4=40	(83-79)x4=16	(81-79)x4=8	(79-79)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (33^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2207$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 84 \times 1.2207 = 103$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 40 \times 1.2207 = 49$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 16 \times 1.2207 = 20$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 8 \times 1.2207 = 10$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
103	49	20	10	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (103 - 49)) = 57.9$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-13

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 29. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 02+400				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
13	33	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	92	87	92	86.5

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-86.5)x4=54	(92-86.5)x4=22	(87-86.5)x4=2	(92-86.5)x4=22	(86.5-86.5)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (33^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2207$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 54 \times 1.2207 = 66$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 22 \times 1.2207 = 27$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 2 \times 1.2207 = 2$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 22 \times 1.2207 = 27$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
66	27	2	27	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (66 - 27)) = 80.1$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-14

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 30. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 02+600				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
14	31	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	93	83	80	79

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-79)x4=84	(93-79)x4=56	(83-79)x4=16	(80-79)x4=4	(79-79)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (31^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2322$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 84 \times 1.2322 = 104$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 56 \times 1.2322 = 69$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 16 \times 1.2322 = 20$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 4 \times 1.2322 = 5$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
104	69	20	5	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (104 - 69)) = 89.3$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-15

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 31. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 02+800				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
15	31	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	89	83.5	80	71

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-71)x4=116	(89-71)x4=72	(83.5-71)x4=50	(80-71)x4=36	(71-71)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (31^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2322$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 116 \times 1.2322 = 143$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 72 \times 1.2322 = 89$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 50 \times 1.2322 = 62$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 36 \times 1.2322 = 44$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
143	89	62	44	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (143 - 89)) = 57.9$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-16

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 32. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 03+000				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
16	31	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	96.5	91	89	78

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-78)x4=88	(96.5-78)x4=74	(91-78)x4=52	(89-78)x4=44	(78-78)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (31^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2322$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 88 \times 1.2322 = 108$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 74 \times 1.2322 = 91$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 52 \times 1.2322 = 64$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 44 \times 1.2322 = 54$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
108	91	64	54	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (108 - 91)) = 183.8$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-17

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 33. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 03+200				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
17	30	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	94	87	83.8	81

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-81)x4=76	(94-81)x4=52	(87-81)x4=24	(83.8-81)x4=11.2	(81-81)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (30^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2381$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 76 \times 1.2381 = 94$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 52 \times 1.2381 = 64$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 24 \times 1.2381 = 30$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 11.2 \times 1.2381 = 14$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
94	64	30	14	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (94 - 64)) = 104.2$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-18

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 34. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 03+400				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
18	30	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	91	85	83	80.5

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-80.5)x4=78	(91-80.5)x4=42	(85-80.5)x4=18	(83-80.5)x4=10	(80.5-80.5)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (30^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2381$
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 78 \times 1.2381 = 97$
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 42 \times 1.2381 = 52$
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 18 \times 1.2381 = 22$
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 10 \times 1.2381 = 12$

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
97	52	22	12	0

Radio de curvatura (m)
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (97 - 52)) = 69.4$

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-19

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 35. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 03+600				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
19	30	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	85	83.5	80	79.3

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-79.3)x4=82.8	(85-79.3)x4=22.8	(83.5-79.3)x4=16.8	(80-79.3)x4=2.8	(79.3-79.3)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (30^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2381$
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 82.8 \times 1.2381 = 103$
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 22.8 \times 1.2381 = 28$
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 16.8 \times 1.2381 = 21$
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 2.8 \times 1.2381 = 3$

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
103	28	21	3	0

Radio de curvatura (m)
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (103 - 28)) = 41.7$

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-20

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 36. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 03+800				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
20	30	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	95	89	87	84.5

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-84.5)x4=62	(95-84.5)x4=42	(89-84.5)x4=18	(87-84.5)x4=10	(84.5-84.5)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (30^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2381$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 62 \times 1.2381 = 77$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 42 \times 1.2381 = 52$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 18 \times 1.2381 = 22$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 10 \times 1.2381 = 12$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
77	52	22	12	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (77 - 52)) = 125.0$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-21

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 37. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 04+000				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
21	30	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	97.5	91	89	88

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-88)x4=48	(97.5-88)x4=38	(91-88)x4=12	(89-88)x4=4	(88-88)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (30^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2381$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 48 \times 1.2381 = 59$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 38 \times 1.2381 = 47$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 12 \times 1.2381 = 15$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 4 \times 1.2381 = 5$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
59	47	15	5	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (59 - 47)) = 260.4$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-22

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 38. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 04+200				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
22	30	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	97	94	93	89

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-89)x4=44	(97-89)x4=32	(94-89)x4=20	(93-89)x4=16	(89-89)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (30^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2381$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 44 \times 1.2381 = 54$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 32 \times 1.2381 = 40$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 20 \times 1.2381 = 25$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 16 \times 1.2381 = 20$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
54	40	25	20	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (54 - 40)) = 223.2$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-23

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 39. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 04+400				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
23	30	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	96	92	90	86

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-86)x4=56	(96-86)x4=40	(92-86)x4=24	(90-86)x4=16	(86-86)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (30^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2381$				
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 56 \times 1.2381 = 69$				
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 40 \times 1.2381 = 50$				
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 24 \times 1.2381 = 30$				
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 16 \times 1.2381 = 20$				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
69	50	30	20	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (69 - 50)) = 164.5$				

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-24

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 40. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 04+600				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
24	30	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformímetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	97.5	89	87	84.2

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-84.2)x4=63.2	(97.5-84.2)x4=53.2	(89-84.2)x4=19.2	(87-84.2)x4=11.2	(84.2-84.2)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad	
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (30^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2381$	
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 63.2 \times 1.2381 = 78$	
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 53.2 \times 1.2381 = 66$	
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 19.2 \times 1.2381 = 24$	
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 11.2 \times 1.2381 = 14$	

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
78	66	24	14	0

Radio de curvatura (m)	
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (78 - 66)) = 260.4$	

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-25

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 41. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 04+800				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
25	30	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformimetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	96	91	89	84.8

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-84.8)x4=60.8	(96-84.8)x4=44.8	(91-84.8)x4=24.8	(89-84.8)x4=16.8	(84.8-84.8)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (30^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2381$
$D_0 = D_0 \times F_c(t-e) = 60.8 \times 1.2381 = 75$
$D_{25} = D_{25} \times F_c(t-e) = 44.8 \times 1.2381 = 55$
$D_{50} = D_{50} \times F_c(t-e) = 24.8 \times 1.2381 = 31$
$D_{75} = D_{75} \times F_c(t-e) = 16.8 \times 1.2381 = 21$

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
75	55	31	21	0

Radio de curvatura (m)
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (75 - 55)) = 156.3$

Fuente: Elaboración propia

Unidad de muestra U-26

El procesamiento de los datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría antes descrita, obteniéndose deflexiones corregidas y el radio de curvatura, a continuación, se detalla los pasos de cálculo realizados:

Factor de corrección por temperatura. En la recopilación de datos se tomó el valor de la temperatura del pavimento en cada unidad de muestra.

Factor de corrección por estacionalidad. De acuerdo a la fecha de trabajo de campo, se puede determinar que el factor se encuentra entre 1.2 a 1.4 según estudio CONREVIAl, para estación seca y subrasante arcillosa sensible al agua, la cual se tomó un valor promedio de 1.3 considerando desfavorable con respecto a la deflexión admisible.

Tabla 42. Cálculo de las Deflexiones corregidas y radio de curvatura

Progresiva Km 05+000				
Muestra	Carpeta de rodadura		Ancho de carril (m)	Numero de carril
	Temperatura(°)	Espesor(cm)		
26	30	5	3.30	2

Lecturas (x10 ⁻²) mm/Deformímetro				
Inicial (0m)	0.25	0.50	0.75	Final (8m)
100	97	93	91	87

Deflexiones (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
(100-87)x4=52	(97-87)x4=40	(93-87)x4=24	(91-87)x4=16	(87-87)x4=0

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad				
$F_c(t-e) = 1.3 / (0.001 \times (30^\circ - 20^\circ) \times 5.00 + 1) = 1.2381$				
D0 = D0 x Fc(t-e) = 52 x 1.2381 = 64				
D25 = D25 x Fc(t-e) = 40 x 1.2381 = 50				
D50 = D25 x Fc(t-e) = 24 x 1.2381 = 30				
D75 = D25 x Fc(t-e) = 16 x 1.2381 = 20				

Deflexiones corregidas (x10 ⁻²) mm				
D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal
64	50	30	20	0

Radio de curvatura (m)				
$R_c = 10 \times 25^2 / (2 \times (64 - 50)) = 223.2$				

Fuente: Elaboración propia

4.8. Interpretación de resultados

Una vez determinado los valores de las Deflexiones corregidas por temperatura y estacionalidad, se elaboró un cuadro resumen (Tabla 43), para luego poder elaborarse el Deflectograma correspondiente.

Tabla 43. Deflexiones y radio de curvatura.

Muestra	Progresiva (Km)	Temp. Pavimento (°C)	Deflexiones corregidas (x10 ⁻²)mm					Radio de curvatura (m)
			D0	D0.25	D0.50	D0.75	Dfinal	
01	00+000	25	61	46	30	15	0	208.31
02	00+200	27	78	58	15	8	0	156.3
03	00+400	29	75	50	25	12	0	125.0
04	00+600	29	85	60	20	7	0	125.0
05	00+800	29	86	36	11	6	0	62.5
06	01+000	32	88	69	25	16	0	164.5
07	01+200	32	78	48	29	20	0	104.2
08	01+400	32	98	49	29	20	0	63.8
09	01+600	33	83	56	23	5	0	115.7
10	01+800	33	98	63	29	15	0	89.3
11	02+000	33	88	44	27	15	0	71.0
12	02+200	33	103	49	20	10	0	57.9
13	02+400	33	66	27	2	27	0	80.1
14	02+600	31	104	69	20	5	0	89.3
15	02+800	31	143	89	62	44	0	57.9
16	03+000	31	108	91	64	54	0	183.8
17	03+200	30	94	64	30	14	0	104.2
18	03+400	30	97	52	22	12	0	69.4
19	03+600	30	103	28	21	3	0	41.7
20	03+800	30	77	52	22	12	0	125.0
21	04+000	30	59	47	15	5	0	260.4
22	04+200	30	54	40	25	20	0	223.2
23	04+400	30	69	50	30	20	0	164.5
24	04+600	30	78	66	24	14	0	260.4
25	04+800	30	75	55	31	21	0	156.3
26	05+000	30	64	50	30	20	0	223.2

Fuente: Elaboración propia

De la cual se obtuvo el valor promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación:

Tabla 44. Parámetros respecto a la deflexión máxima, D_0 ($\times 10^{-2}$) mm

Valor promedio	85.1
Desviación estándar	19.2
Coefficiente de variación	22.5

Fuente: Elaboración propia

4.8.1. Cálculo de los parámetros

a. **Deflexión Promedio:** Usamos ecuación (3)

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

$$\bar{D} = 85.10 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

b. **Deflexión Característica:** Usamos ecuación (6)

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

$$D_c = 85.10 + 1.645 \times 19.20$$

$$D_c = 116.7 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

c. **Deflexión Admisible:** Usamos ecuación (7)

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

N18 Calculado en el Estudio de Transito, Anexo 3.

$$D_a = \left(\frac{1.15}{2.087543} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$D_a = 86.20 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

d. **Deflexión Crítica:** Usamos ecuación (8)

$$D_{cr} = \left(\frac{1.90}{N_{18}} \right)^{\frac{1}{5.3}}$$

$$D_{cr} = \left(\frac{1.90}{2.087543} \right)^{\frac{1}{5.3}}$$

$$D_{cr} = 98.20 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

4.9. Evaluación de los parámetros

A continuación, veremos los principales parámetros de la Deflexión y radios de curvatura de cada muestra tomada y el análisis de la condición del pavimento según el método CONREVIAL.

Tabla 45: Evaluacion de los parametros

Muestra	Progresiva (Km)	Deflexión máxima (x10 ⁻²) mm	Deflexión Admisible (x10 ⁻²) mm	Radio de Curvatura (m)	Radio de curvatura mínimo(m)	Tipo de subrasante	Tipo de pavimento	Calidad estructural
01	00+050	61	86.2	208	100	Bueno	Bueno	Buena
02	00+200	78	86.2	156	100	Bueno	Bueno	Buena
03	00+400	75	86.2	125	100	Bueno	Bueno	Buena
04	00+600	85	86.2	125	100	Bueno	Bueno	Buena
05	00+800	86	86.2	63	100	Bueno	Malo	Regular
06	01+000	88	86.2	164	100	Malo	Bueno	Bueno
07	01+200	78	86.2	104	100	Bueno	Bueno	Bueno
08	01+400	98	86.2	64	100	Malo	Malo	Malo
09	01+600	83	86.2	116	100	Bueno	Bueno	Bueno
10	01+800	98	86.2	89	100	Malo	Malo	Malo
11	02+000	88	86.2	71	100	Malo	Malo	Malo
12	02+200	103	86.2	58	100	Malo	Malo	Malo
13	02+400	66	86.2	80	100	Bueno	Malo	Regular
14	02+600	104	86.2	89	100	Malo	Malo	Malo
15	02+800	143	86.2	58	100	Malo	Malo	Malo
16	03+000	108	86.2	184	100	Malo	Bueno	Bueno
17	03+200	94	86.2	104	100	Malo	Bueno	Bueno
18	03+400	97	86.2	69	100	Malo	Malo	Malo
19	03+600	103	86.2	42	100	Malo	Malo	Malo
20	03+800	77	86.2	125	100	Bueno	Bueno	Bueno
21	04+000	59	86.2	260	100	Bueno	Bueno	Bueno
22	04+200	54	86.2	223	100	Bueno	Bueno	Bueno
23	04+400	69	86.2	164	100	Bueno	Bueno	Bueno
24	04+600	78	86.2	260	100	Bueno	Bueno	Bueno
25	04+800	75	86.2	156	100	Bueno	Bueno	Bueno
26	05+000	64	86.2	223	100	Bueno	Bueno	Bueno

Fuente Elaboración propia

La evaluación se realiza de acuerdo a los criterios de evaluación estructural de pavimentos de acuerdo al método CONREVIAL (Tabla 16) y el criterio DNER PRO 011-79 (Tabla 17).

4.10. Análisis de resultados

Ahora haremos el análisis correspondiente, enmarcándonos en nuestro objetivo principal que es, determinar el comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Cajamarca – Jesús, en su tramo desvío a Llacanora - la Huaraclla, mediante deflexiones con el deflectómetro Viga Benkelman. Así como también contrastar nuestra hipótesis planteada.

A. Comportamiento de la subrasante.

En el grafico 1, se puede apreciar que la carretera en estudio en función a sus deflexiones, el 42% presenta un mal comportamiento, mientras que el 58% de muestra presenta un buen comportamiento estructural.

La condición de mal comportamiento de la subrasante indica que las deflexiones máximas superan o es grandes respecto a la deflexión admisible, mientras que el porcentaje que nos indica un buen comportamiento estructural es cuando las deflexiones máximas son menores o pequeñas respecto a la admisible.

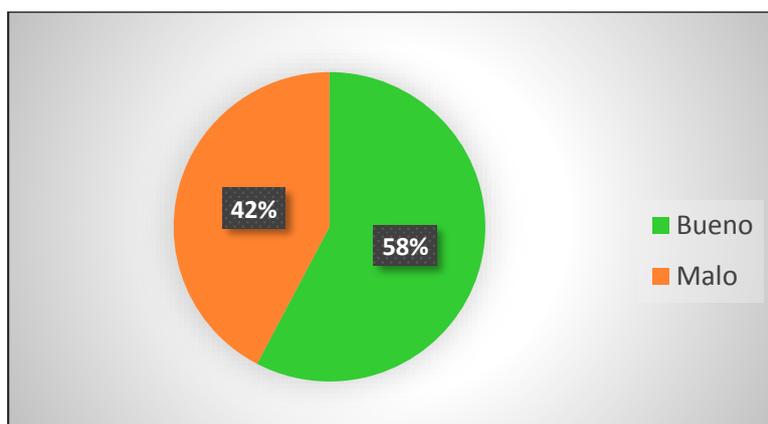
Las causas asociadas a este mal comportamiento de la subrasante, vendrían a ser un mal proceso constructivo en la compactación de la subrasante, un mal drenaje que saturo al suelo de la subrasante.

Tabla 46. Deflexiones máximas respecto a la deflexión admisible.

Deflexiones > Deflexión admisible (no cumplen el diseño)		Deflexiones < Deflexión admisible (cumplen el diseño)	
cantidad	Porcentaje (%)	cantidad	Porcentaje (%)
11	42	15	58

Fuente: Elaboración propia

Grafico 1: Comportamiento de la subrasante



Fuente: Elaboración propia

B. Comportamiento del pavimento.

El grafico 2 muestra la condición de la carretera en estudio, donde el 38% presenta un mal comportamiento, mientras que el 62% de muestra presenta un buen comportamiento estructural del pavimento.

La condición de buen comportamiento del pavimento indica que el radio de curvatura de las muestras supera al mínimo establecido por método CONREVIAl, en tanto que la condición de mal comportamiento estructural indica que los radios de curvaturas de estas muestras son menores al radio mínimo establecido (100m).

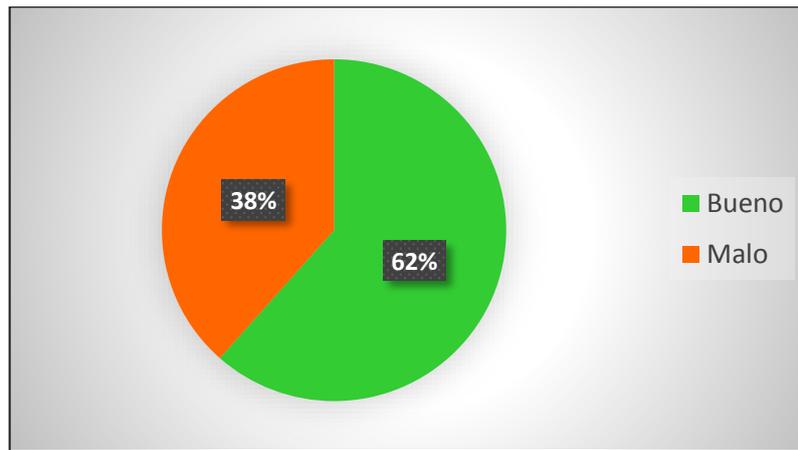
Las causas asociadas a este comportamiento del pavimento, vendrían a ser un mal diseño de las terracerías (carpeta de rodadura, base, subbase), el aumento del tráfico para el que fue diseñado, o las fallas ocasionadas por los agentes climatológicos.

tabla 47. Radios de curvatura del ensayo respecto al radio mínimo.

Radios de curvatura < 100m (no cumplen el radio mínimo)		Radios de curvatura > 100 m (cumplen el radio mínimo)	
cantidad	Porcentaje (%)	cantidad	Porcentaje (%)
10	38	16	62

Fuente: Elaboración propia

Grafico 2: Comportamiento del pavimento



Fuente: elaboración propia

C. Calidad estructural

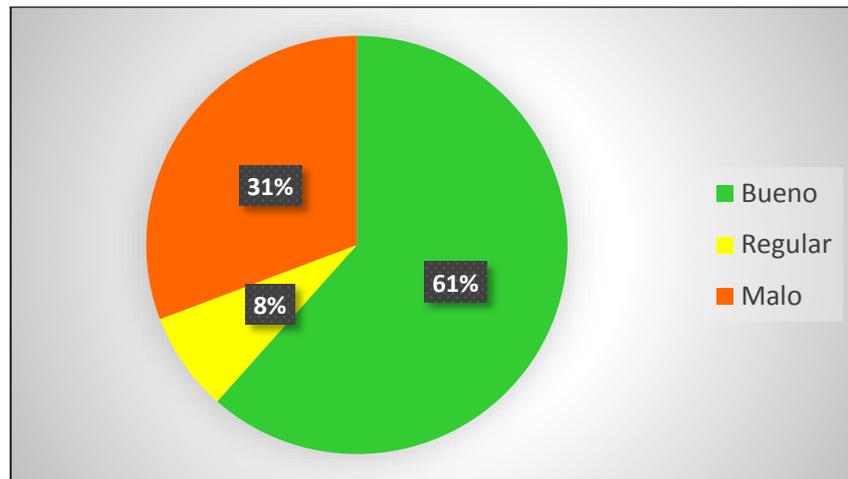
La calidad estructural la obtenemos comparando la deflexión promedio respecto a la deflexión admisible, así mismo también comparamos los radios de curvatura de cada muestra tomada respecto al radio mínimo establecido (100 m), de acuerdo al criterio DNER (Tabla 17).

En el grafico 3 muestra la calidad estructural de la vía en estudio, donde el 61% es buena, mientras que el 8% es regular y el 31% es de mala calidad.

Según el criterio DNER las medidas de corrección que se debe aplicar son:

- Para los porcentajes que presenta buena calidad aplicar solo correcciones superficiales.
- Para los porcentajes que presenta de regular a mala calidad aplicar refuerzo o reconstrucción.

Grafico 3: Calidad estructural



Fuente: Elaboración propia

D. Comparación de parámetros

En la tabla 48 presentamos la comparación de los parámetros de evaluación del pavimento en estudio, en donde la deflexión característica es mayor a la deflexión admisible y el radio de curvatura promedio si cumple con el radio mínimo establecido por el método CONREVIAl.

Tabla 48: comparación de parámetros

Parámetros a evaluar		Parámetros propuestos por el método CONREVIAl.	
Deflexión característica (mm)	Radio de curvatura promedio (m)	Deflexión admisible (mm)	Radio de curvatura (m)
116.7×10^{-2}	130	86.2×10^{-2}	> 100

Fuente: Elaboración propia

E. Variación del radio de curvatura

En la gráfica 4, comparamos el radio de curvatura mínimo (100 m) establecido por el estudio CONREVIAl respecto a los radios de curvatura de nuestro estudio, donde podemos ver la variación desde la más pequeña (42 m) hasta el radio de curvatura más grande (260 m).

F. Deflectograma

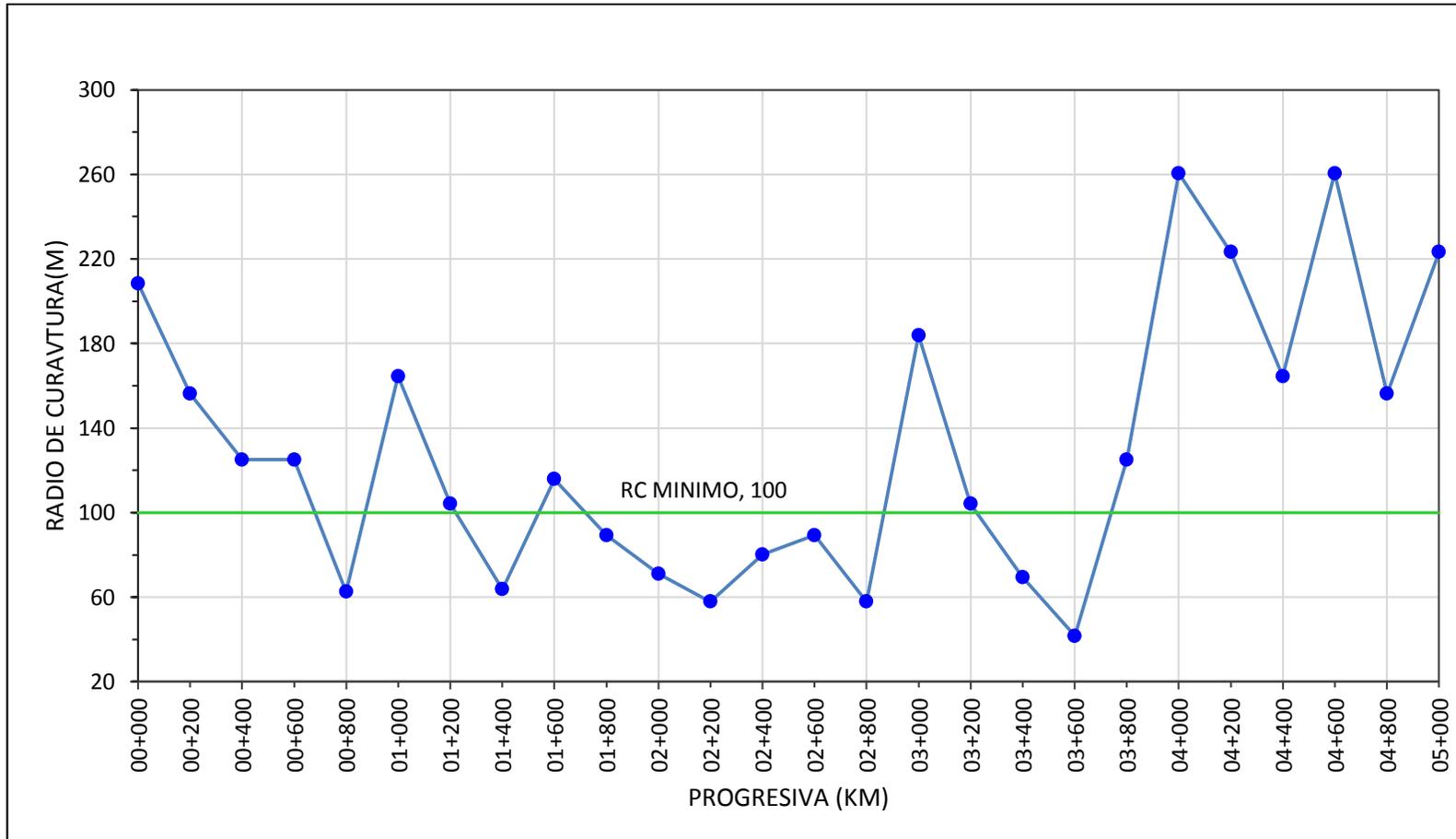
En el Grafico 5, se muestra el Deflectograma de deflexiones producto de graficar las deflexiones máximas obtenidas en cada punto evaluado del carril de estudio, donde podemos observar las variaciones desde 54×10^{-2} mm. hasta 143×10^{-2} mm. aproximadamente; siendo los puntos más elevados los que presentan menor capacidad estructural. Además, nos muestra que la deflexión característica (116.7×10^{-2} mm) supera a la deflexión admisible (86.2×10^{-2} mm), esto indica que ya no se garantiza un buen comportamiento del pavimento.

G. Cuenco de deflexiones

Para graficar la curva del cuenco de deflexiones (Grafica 6), se tomó el promedio de las deflexiones a 25 cm, 50 cm, 75 cm y la deflexión final de cada punto ensayado, para el carril de estudio, con estos datos del pavimento se puede observar que el cuenco presenta una curva extensa y profunda, por lo tanto, de acuerdo a la figura 29, el cuenco de deflexiones es de tipo II, y se lo describe de la siguiente manera:

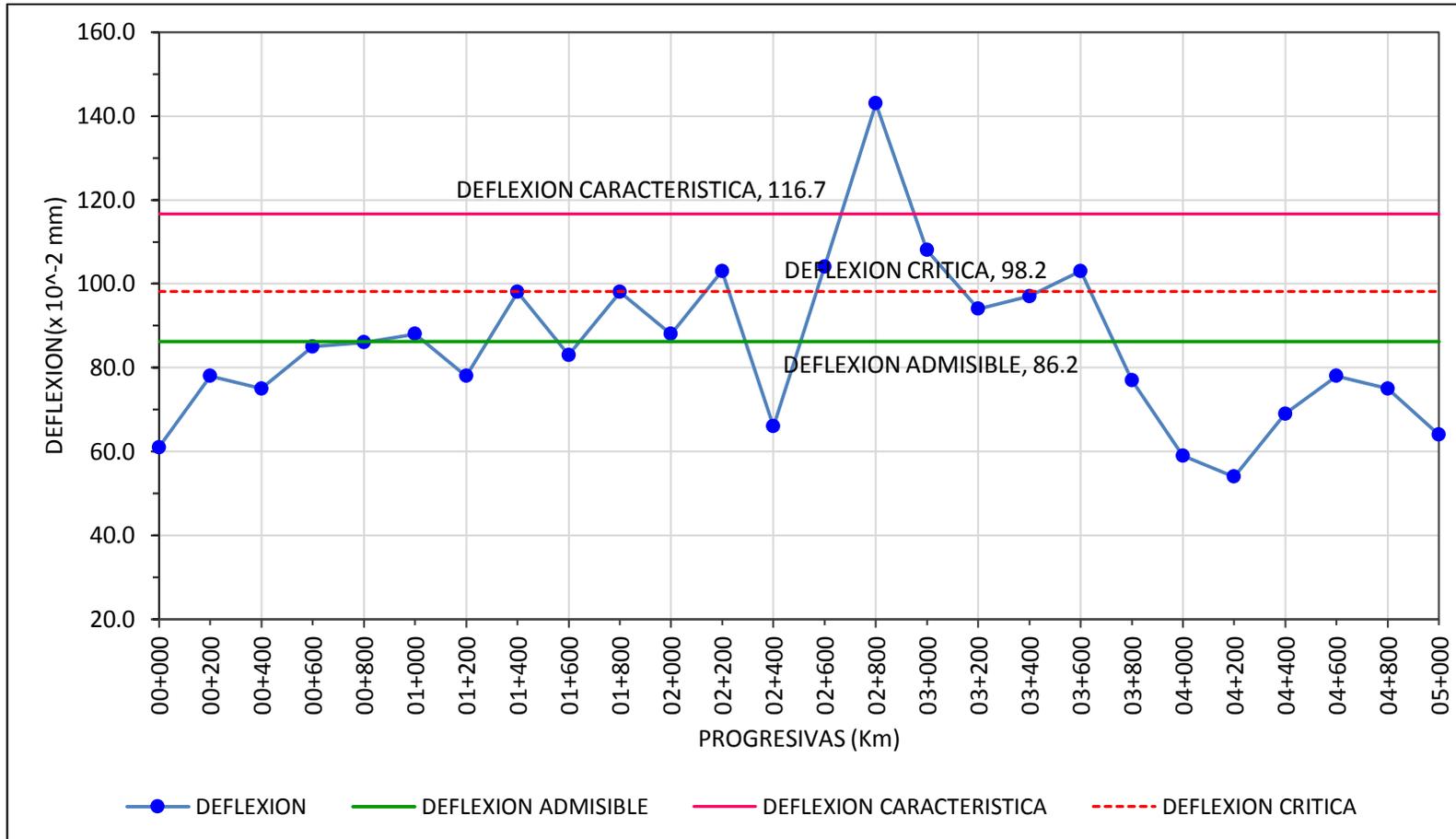
Tipo II: Estos modelos de deformación poseen un mal comportamiento estructural de subrasante y un buen comportamiento estructural del pavimento, ya que presentan un radio de curvatura mediana y una deflexión grande. Esto debido a que presentan un pavimento con sus capas en regular estado de deterioro, Pero una subrasante que posee materiales que no cumplen con la calidad solicitada.

Grafico 4: Radio de curvatura vs progresivas Km 00+000 al Km 05+000.



Fuente: elaboración propia

Grafico 5: Deflectograma, Km 00+000 al Km 05+000



Fuente: Elaboración propia

Grafico 6. Cuenco de deflexiones, km 00+00 al km 05+000



Fuente: Elaboración propia.

H. Comparación con resultados de Carahuatay.

De acuerdo a la investigación de Carahuatay, los datos obtenidos en campo de la carretera San Miguel – San Pablo, obtiene una deflexión característica de 188.35×10^{-2} mm, una deflexión admisible de 108×10^{-2} mm y una deflexión crítica de 177×10^{-2} mm. En tanto que en el presente trabajo de investigación obtuvimos una $D_c = 116.7 \times 10^{-2}$ mm, $D_a = 86.2 \times 10^{-2}$ mm y una $D_{cr} = 98.20 \times 10^{-2}$ mm respectivamente, por lo que en ambos casos se ha determinado la estructura del pavimento no presenta un adecuado comportamiento estructural, en el caso de la carretera San Miguel - San Pablo, mientras que en la carretera Cajamarca – Jesús se tiene un comportamiento en regular calidad, esto nos permite deducir que la carretera san miguel san pablo presenta mayor daños o fallas.

Se ha determinado además que la subrasante de la carretera San pablo San Miguel corresponde a una subrasante buena y un pavimento malo, en el caso de la carretera en estudio la subrasante se encuentra fatigada tiene una respuesta mala y el pavimento está en regular calidad. Esta diferencia se debe a que los datos tomados en campo pertenecen a lugares diferentes.

4.11. Contrastación de la hipótesis

Según los resultados obtenidos, no hemos logrado demostrar la hipótesis planteada, debido a que la estructura vial de la carretera Cajamarca-Jesús, tramo desvío a Llacanora – la Huaraclla presenta un comportamiento estructural de regular calidad.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- ❖ Se determinó el comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Cajamarca-Jesús, tramo desvío a Llacanora - la Huaraclla, mediante el análisis deflectométrico, indicándonos que dicha carretera presenta actualmente un comportamiento estructural en regular calidad.
- ❖ Se realizó el levantamiento topográfico de la vía, obteniéndose una longitud de 5000 metros lineales, de las cuales se analizaron un total de 26 unidades de muestra.
- ❖ Se realizó el estudio de tráfico, llegándose a determinar un índice medio diario anual de 1261 veh/día.
- ❖ Mediante el análisis deflectométrico del pavimento se obtuvieron los valores siguientes:
 - Deflexión promedio igual a 85.1×10^{-2} mm.
 - Deflexión característica igual a 116.7×10^{-2} mm.
 - Deflexión admisible igual a 86.2×10^{-2} mm.
 - Deflexión crítica igual a 98.2×10^{-2} mm.

5.2. Recomendaciones

- ❖ Se recomienda realizar los estudios en estación de lluvia, ya que en ese periodo las muestras representativas están en su estado más desfavorable.
- ❖ Se recomienda tener certificación de calibración de la viga Benkelman para evitar toma de datos alterados, y así obtener medidas reales que nos permitan sugerir de manera segura mantenimientos futuros.
- ❖ Se recomienda a las entidades correspondientes a realizar el monitoreo periódico de la vía en estudio y del país con la finalidad de evitar graves daños estructurales que demanden mayores costos de mantenimientos.
- ❖ Utilizar el presente trabajo como referencia para fines de mantenimiento de la vía en mención.
- ❖ Se recomienda tomar todas las medidas de seguridad durante la toma de muestras a lo largo de la vía ya que por su misma naturaleza de vías rápidas los vehículos circulan a mucha velocidad que pueden causar accidentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Escobar y García. 2007. Análisis Comparativo de la Evaluación de Pavimentos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectometro de Impacto (FWD). El Salvador. Universidad de el Salvador. 169 p.
- Gutiérrez, J. 2007. Modelación Geotécnica de Pavimentos Flexibles con Fines de Análisis y Diseño en el Perú. Perú. UNI. 92 p.
- Mario y Hoffman. 1985. Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones (Ensayos no Destructivos). 23 p.
- MTC E 1002-2000. Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible Empleando la Viga Benkelman. 5 p.
- CONREVIAl. 1983. Estudio De Rehabilitación De Carreteras En El País, Capítulo VI: Aspectos De Evaluación De Pavimentos, Volumen C. Perú. MTC.
- AASHTO. 2001. “Standards Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Part 2B: Test”. Washington. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM. 2001. “Road and Paving Materials; Vehicle – Pavement System”. Association Society for Testing Materials. Washington.
- Ignacio, J. 2013. Tesis “Análisis Deflectométrico de las capas del pavimento flexible con subrasante de suelo arenoso en la Panamericana Norte km 355+500 al 375 al 500”. UNC. Perú. 131 p.
- Hernández, W. 2014. Índice de Condición de Pavimento de la Carretera Jancos – San Miguel de Pallaques, Cajamarca. Perú. UNC. 225 p.

ANEXO 1

PANEL FOTOGRAFICO

Figura A1.01. Vista del punto de inicio, en Iscocongá.



Fuente: Elaboración propia

Figura A1.02. Hito kilométrico, Km 00+000, en el inicio del tramo de carretera.



Fuente: Elaboración propia

Figura A1.03. marcado y orificio de la vía para la toma de muestras.



Fuente: Elaboración propia

Figura A1.04. En la fotografía se observa una falla en la vía.



Fuente: Elaboración propia

Figura A1.05. orificio en el pavimento asfáltico para la toma de temperatura.



Fuente: Elaboración propia

Figura A1.06. realizando la toma de temperatura con el termómetro.



Fuente: Elaboración propia

Figura A1.07. Viga Benkelman entre los ejes posteriores del Volquete, para la toma de muestra.



Fuente: Elaboración propia

Figura A1.08. Conos de seguridad.



Fuente: Elaboración propia

Figura A1.09. Marcado de la vía cada 25 cm, Km 05+000.



Fuente: Elaboración propia

Figura A1.10. Toma de la Unidad de Muestra – Km 05+000.



Fuente: Elaboración propia

Figura A1.11. ubicación de conos



Fuente: Elaboración propia

Figura A1.12. Equipo de trabajo.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2

NORMA MTC E 1002-2000

MEDIDA DE LA DEFLEXIÓN Y DETERMINACIÓN DEL RADIO DE
CURVATURA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE EMPLEANDO LA VIGA
BENKELMAN

MEDIDA DE LA DEFLEXIÓN Y DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE EMPLEANDO LA VIGA BENKELMAN

MTC E 1002 – 2000

Este Modo Operativo está basado en la Norma ASTM D 4695, la misma que se ha adaptado al nivel de implementación y a las condiciones propias de nuestra realidad. Cabe indicar que este Modo Operativo está sujeto a revisión y actualización continua.

Este Modo Operativo no propone los requisitos concernientes a seguridad. Es responsabilidad del Usuario establecer las cláusulas de seguridad y salubridad correspondientes, y determinar además las obligaciones de su uso e interpretación

1. OBJETIVO

Detalla el procedimiento para determinar simultáneamente con una viga Benkelman la Deflexión Recuperable y el Radio de Curvatura de un pavimento flexible, producidos por una carga estática. A tal fin se utiliza un camión donde la carga, tamaño de llantas, espaciamiento entre ruedas duales y presión de inflado están normalizadas.

2. APARATO

2.1 Una viga Benkelman de doble brazo con sus correspondientes diales registradores (al 0.01 mm y recorrido 12 mm) y las siguientes dimensiones fundamentales:

- Longitud del primer brazo de ensayo, desde el pivote a la punta de prueba = 2,440 m.
- Longitud del primer brazo de ensayo, desde el pivote al punto de apoyo del vástago de su dial registrador = 0,610 m.
- Longitud del segundo brazo de ensayo, desde el pivote a la punta de prueba = 2,190 m.
- Longitud del segundo brazo de ensayo, desde el pivote al punto de apoyo del vástago de su dial registrador = 0,5475 m.

Nota 1. Se permite el empleo de vigas con dimensiones diferentes siempre y cuando no sean tan reducidas que el radio de acción de la carga no afecte permanentemente la posición de sus patas (ver numeral 3.8).

2.2 Un camión para ensayo con las siguientes características.

El eje trasero pesará en la balanza 8.175 kilogramos, igualmente distribuidos en sus ruedas duales y estará equipado con llantas de caucho y cámaras neumáticas. Las llantas deberán ser 10" x 20"; 12 lonas e infladas a 5,6 kg/cm² (80 libras por pulgada cuadrada). La distancia entre los puntos medios de la banda de rodamiento de ambas llantas de cada rueda dual deber ser de 32 cm.

- 2.3 Un medidor de presión de inflado.
- 2.4 Un termómetro de 0 a 100 °C con divisiones cada grado.
- 2.5 Un barreno para ejecutar orificios en el pavimento de 4 cm de profundidad y 10 mm de diámetro.
- 2.6 Un cronometro.
- 2.7 Una Wincha de acero de 2 m y otra de 25 m.
- 2.8 Un vibrador.

3. PROCEDIMIENTO

3.1 El punto del pavimento a ser ensayado deberá 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 utilizar las distancias indicadas en la Tabla A2.1

Tabla A2.1

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

3.2 La rueda dual externa del camión deberá ser colocada sobre el punto seleccionado; para la correcta ubicación de la misma, deberá colocarse en la parte trasera extrema del camión una guía vertical en correspondencia con el eje de carga. Desplazando suavemente el camión, se hace coincidir la guía vertical con la línea transversal indicada en 3,1 de modo que simultáneamente el punto quede entre ambas llantas de la rueda dual.

3.3 Se coloca la viga sobre el pavimento, detrás del camión, perpendicularmente al eje de carga, de modo que la punta de prueba del primer brazo coincida con el punto de ensayo y la viga no roce contra las llantas de la rueda dual.

3.4 Se liberan los seguros de los brazos y se ajusta la base de la viga por medio del tornillo trasero, de manera que los dos brazos de medición queden en contacto con los diales.

3.5 Se ajustan a los diales de modo que sus vástagos tengan un recorrido libre comprendido entre 4 y

6 mm. Se giran las esferas de los diales hasta que las agujas queden en cero y se verifica la lectura

Golpeándolos suavemente con un lápiz. Girar la esfera si es necesario y repetir la operación hasta obtener la posición 0 (cero).

3.6 Se hace avanzar suave y lentamente el camión; se pone en marcha el cronómetro y vibrador y se leen los diales cada 60 segundos. Cuando dos lecturas sucesivas de cada uno de ellos no difieran en más de 0,01 mm, se da por finalizada la recuperación, registrándose las últimas lecturas observadas (L0 y L25)

3.7 Con el fin de medir la temperatura del pavimento se practica un orificio (antes de comenzar el ensayo y simultáneamente con el trazado de la línea), cuyas dimensiones serán: 4 cm de profundidad y 10 mm de diámetro, aproximadamente, emplazado sobre la línea paralela al eje del camino, que pasa por el punto de determinación de la deflexión y a 50 cm del mismo, en el sentido de avance del camión. Se llena con aceite no menos de 10 minutos antes de iniciar el ensayo, se inserta el termómetro y se lee la temperatura, retirando el mismo antes del desplazamiento del camión.

El rango de temperatura de trabajo deberá quedar dentro de los siguientes límites: Límite inferior :

5 °C

Límite superior: 35 °C

3.8 No obstante el límite superior indicado en el párrafo 3.7, el ensayo no se deberá efectuar a temperaturas inferiores si ellas producen deformación plástica entre ambas llantas de la rueda dual. Para detectar si dicha deformación se produce, se deberá proceder de la siguiente forma:

Una vez registradas las lecturas L0 y L25, se hace retroceder suave y lentamente el camión hasta que la rueda dual externa quede colocada sobre el punto de ensayo, observando la marcha en la aguja del dial. Si alcanzada cierta posición la aguja se detiene y luego se observa un desplazamiento en sentido contrario, como si se produjera la recuperación del pavimento, ello indica que existe deformación plástica medible entre ambas llantas de la rueda dual. Esa aparente recuperación puede ser. Debida, también, al hecho de que el radio de acción de la carga del camión afecte las patas de la viga (ver numeral 3.9).

3.9 Tampoco deberá efectuarse el ensayo si, aun cuando no se detectara deformación plástica mediante el procedimiento recién indicado, se constata que el radio de acción de la carga del camión afecta las patas de la regla, para lo cual se procederá de la siguiente forma:

Una vez registradas las lecturas de los diales, se hace retroceder lentamente el camión observando el dial del primer brazo. Cuando se observe que el dial comienza a desplazarse acusando la deformación producida por la carga, se marca sobre el pavimento la posición de la guía vertical mencionada en el párrafo 3.2 y se detiene el retroceso del camión.

Se mide la distancia entre la punta de prueba del primer brazo y la marca practicada sobre el pavimento, de acuerdo con lo indicado antes. Sea d esa distancia, si d es mayor de 2,40 m, la acción de la carga del camión afecta las patas de la viga.

4. CÁLCULOS

4.1 La deflexión bajo el eje de la carga (D_0), se calcula mediante la expresión: $D_0 = 4 \times L_0$.

(Expresada en 0,01 mm)

Donde L_0 es la lectura registrada en el dial del primer brazo de ensayo.

4.2 La deflexión a 25 cm del eje de la carga (D_{25}), se calcula con la expresión: $D_{25} = 4 \times L_{25}$

(expresada en 0.01 mm).

Nota 2. El valor 4 usado por el cálculo de D_0 y D_{25} obedece a que la relación de longitudes de brazo indicadas en 2.1 es 4. En caso de que la viga utilizada tenga una relación diferente, se aplicará el factor que corresponda.

4.3 El radio de curvatura en el punto de ensayo se calcula con la expresión

$$RC = \frac{3125}{(D_0 - D_{25})} \text{ Expresado en mm}$$

5. INFORME

Para cada ensayo, el informe deberá incluir la abscisa de la prueba, el estado superficial y la temperatura del pavimento, las deflexiones ($D_0 - D_{25}$) y el radio de curvatura (R_c).

La aplicación de correcciones por efecto de la temperatura y el procesamiento estadístico de los datos, se efectuarán conforme lo establezca la normativa respectiva.

6. REFERENCIAS NORMATIVAS

ASTM	D 4695
------	--------

ANEXO 3

ESTUDIO DE TRANSITO

CARRRETERA: CAJAMARCA-JESUS
TRAMO: DV. A LLACANORA-LA HUARACLLA
ESTACION: QSI-01: KM 00+500-LA COLPA
SENTIDO: AMBOS

ESTUDIO DEL TRÁNSITO

El estudio de tránsito de la carretera en análisis es parte de los estudios para la presente evaluación del pavimento y tiene como objetivo principal determinar el número de repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 toneladas, esto a través del cálculo del índice medio diario (IMD).

Evaluación del tránsito existente

La carretera en estudio está ubicada al sur de la ciudad de Cajamarca que conecta el distrito de Cajamarca con la capital del distrito de Jesús de la provincia de Cajamarca. El flujo vehicular que transita por esta vía Cajamarca - Jesús, tramo desvío a Llacanora-la Huaraclla, está compuesto por: autos, camionetas, combis, ómnibus (B2, B3), camión volquetes (C2, C3, C4) y vehículos articulados T3S3.

Índice Medio Diario Anual (IMDA)

El Índice Medio Diario Anual (IMDA) es el valor numérico estimado del tráfico vehicular en un determinado tramo de la red vial en un año. El IMDA es el resultado de los conteos volumétricos y clasificación vehicular en campo en una semana, y un factor de corrección que estime el comportamiento anualizado del tráfico de pasajeros y mercancías.

$$\text{IMDA} = \text{IMDS} \times \text{FC}$$

Donde:

IMDS: Índice Medio Diario Semanal o Promedio de Tráfico Diario Semanal

FC: representa el Factor de Corrección Estacional

El Índice Medio Diario Semanal (IMDS) se obtiene a partir del volumen de tráfico diario registrado por tipo de vehículo en un tramo de la red vial durante 7 días.

$$IMDS = \frac{\sum Vi}{7}$$

Donde:

Vi: Volumen vehicular diario de cada uno de los 7 días de conteo volumétrico.

El Factor de Corrección Estacional (FC), es un valor numérico requerido para expandir la muestra del flujo vehicular semanal realizado a un comportamiento anualizado del tránsito. Dicho valor es proporcionado por PROVIAS NACIONAL.

A continuación, luego de procesar los datos del conteo vehicular, se presenta la tabla del promedio semanal y el IMDA corregidos con el factor de corrección estacional del mes de agosto 2016 de la estación ciudad de Dios, que es la más próxima a la vía de estudio.

Tabla A3.1: Promedio semanal

HORA	VEHICULOS LIGEROS				BUS		CAMIONES UNITARIOS			CAMIONES ACOPLADOS								TOTAL	%
	Autos	Pick up	Combi	Micros	B2	B3-1	C2	C3	C4	T2S2	T2S3	T3S2	T3S3	C2R2	C2R3	C3R2	C3R3		
00-01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00%
01-02	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.29	0.02%
02-03	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.71	0.05%
03-04	1	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.14	0.08%
04-05	5	4	2	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.29	0.77%
05-06	10	9	6	-	4	-	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29.71	2.03%
06-07	27	19	10	-	7	-	4	1	-	-	-	-	0	-	-	-	-	67.00	4.59%
07-08	34	26	9	-	6	-	8	2	4	-	-	-	0	-	-	-	-	88.86	6.08%
08-09	35	23	7	-	7	-	9	5	4	-	-	-	1	-	-	-	-	90.29	6.18%
09-10	35	30	10	-	7	-	9	3	1	-	-	-	1	-	-	-	-	96.14	6.58%
10-11	42	34	9	-	7	-	7	3	1	-	-	-	1	-	-	-	-	104.43	7.15%
11-12	37	34	9	-	7	-	10	3	1	-	-	-	1	-	-	-	-	103.00	7.05%
12-13	35	33	8	-	8	-	5	2	1	-	-	-	0	-	-	-	-	94.14	6.44%
13-14	34	31	9	-	7	-	5	2	1	-	-	-	1	-	-	-	-	89.00	6.09%
14-15	32	28	7	-	7	-	5	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	82.29	5.63%
15-16	33	27	7	-	7	-	5	2	1	-	-	-	1	-	-	-	-	84.14	5.76%
16-17	30	27	9	-	7	-	4	2	1	-	-	-	1	-	-	-	-	80.57	5.52%
17-18	63	47	13	-	9	-	11	6	1	-	-	-	1	-	-	-	-	150.86	10.33%
18-19	62	45	9	-	6	-	5	4	1	-	-	-	1	-	-	-	-	132.43	9.07%
19-20	38	34	9	-	5	-	5	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	93.00	6.37%
20-21	17	14	7	-	5	-	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44.00	3.01%
21-22	7	6	2	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.00	1.10%
22-23	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.43	0.10%
23-24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00%
TOTAL	578	471	143	0	107	0	93	39	20	0	0	0	10	0	0	0	0	1461	100.00%
%	39.58%	32.22%	9.80%	0.00%	7%	0.00%	6.36%	2.66%	1%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	100%	Ok!!!

1461

Fuente: Elaboración propia

TABLA A3.2: ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL

CARRRETERA:	CAJAMARCA-JESUS	SENTIDO:	AMBOS
TRAMO:	DV. A LLACANORA-LA HUARACLLA	F. CORR. LIV.:	0866005
ESTACION, QSI-01:	Km 00+500-LA COLPA	F. CORR.PES.:	0.837545
SENTIDO:	AMBOS		

DIA	SENTIDO	VEHICULOS	BUS		CAMIONES UNITARIOS			CAMIONES ACOPLADOS	TOTAL
		LIGEROS (AC)	B2	B3-1	C2	C3	C4	T3S3	
LUNES	CAJAMARCA-JESUS	593	53	0	60	24	11	7	748
	JESUS-CAJAMARCA	627	47	0	62	22	13	5	775
	AMBOS	1220	100	0	122	46	23	12	1523
MARTES	CAJAMARCA-JESUS	508	50	0	36	21	8	4	627
	JESUS-CAJAMARCA	512	46	0	39	27	7	4	634
	AMBOS	1020	96	0	75	48	14	8	1261
MIERCOLES	CAJAMARCA-JESUS	472	38	0	33	14	11	3	571
	JESUS-CAJAMARCA	501	40	0	38	12	9	3	602
	AMBOS	973	78	0	70	26	20	7	1174
JUEVES	CAJAMARCA-JESUS	517	51	0	34	14	9	5	630
	JESUS-CAJAMARCA	527	51	0	38	16	9	3	643
	AMBOS	1044	102	0	71	30	18	8	1273
VIERNES	CAJAMARCA-JESUS	480	50	0	34	15	8	4	591
	JESUS-CAJAMARCA	488	52	0	24	11	9	4	588
	AMBOS	967	102	0	58	26	18	8	1179
SABADO	CAJAMARCA-JESUS	509	42	0	26	16	7	6	606
	JESUS-CAJAMARCA	529	41	0	37	8	5	5	624
	AMBOS	1038	83	0	63	23	12	11	1230
DOMINGO	CAJAMARCA-JESUS	479	42	0	38	13	5	3	581
	JESUS-CAJAMARCA	485	47	0	48	15	5	2	601
	AMBOS	964	89	0	85	28	10	5	1182
PROMEDIO		1032 Veh/dia	93 Veh/dia	0 Veh/dia	78 Veh/dia	33 Veh/dia	17 Veh/dia	8 Veh/dia	1261 Veh/dia

Fuente: Elaboración propia

Tabla A3.3 Resumen IMDA

Tipo de vehículo	IMD Anual	%
LIGEROS (AC)	1032	81.8%
B2	93	7.4%
B3	0	0.0%
C2	78	6.2%
C3	33	2.6%
C4	17	1.3%
T3S3	8	0.6%
TOTAL	1261	100%

Fuente: elaboración propia

Factor de equivalencia de carga

De los estudios experimentales desarrollados, se han obtenido ecuaciones crecientes, de relación exponencial del orden de 4, entre la carga real y la del eje referencial. Estas experiencias ampliamente difundidas, dan lugar a establecer factores de equivalencia de carga, tanto para cada tipo de composición vehicular, que permiten cuantificar el tremendo efecto destructivo de los vehículos más pesados. El eje estándar adoptado es un eje simple de 8.2 ton, se puede tomar el criterio simplificado de la metodología AASHTO, aplicando las siguientes relaciones para vehículos pesados, buses y camiones:

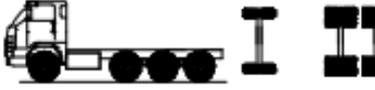
Tabla A3.4: relación de cargas por eje para determinar los ejes equivalentes(EE), para afirmados, pavimentos flexibles y semirrígidos.

TIPO DE EJE	Eje Equivalente
	EE 8.2 TN.
a. Ejes Simples de rueda simple [EE _{S1}]	$\left[\frac{P}{6.6} \right]^4$
b. Ejes Simples de rueda doble [EE _{S2}]	$\left[\frac{P}{8.2} \right]^4$
c. Ejes Tándem (1 eje rueda doble + 1 eje rueda simple) [EE _{TA1}]	$\left[\frac{P}{14.8} \right]^4$
d. Ejes Tándem (2 ejes ruedas dobles) [EE _{TA2}]	$\left[\frac{P}{15.1} \right]^4$
e. Ejes Tridem (2 ejes ruedas dobles + 1 eje rueda simple) [EE _{TR1}]	$\left[\frac{P}{20.7} \right]^{3.9}$
f. Ejes Tridem (3 ejes ruedas dobles) [EE _{TR2}]	$\left[\frac{P}{21.8} \right]^{3.9}$
P = Peso real por eje en toneladas	

Fuente: Manual de carreteras-sección suelos y pavimentos-AASHTO 1993

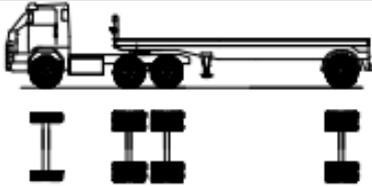
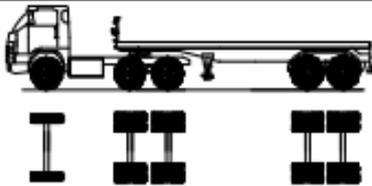
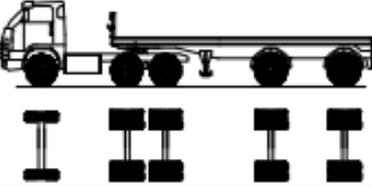
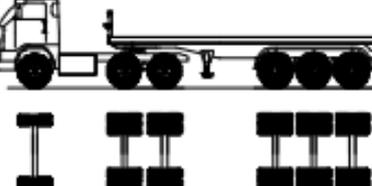
Trenes de Carga de los diferentes tipos de Vehículos.

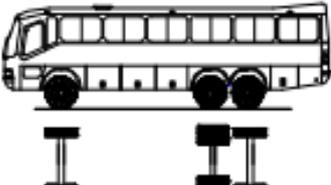
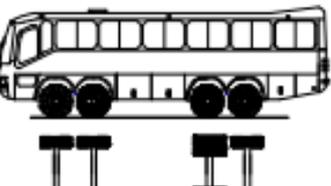
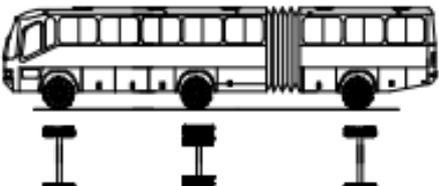
Tabla A3.5: pesos y medidas máximas permitidas (1/2)

TABLA DE PESOS Y MEDIDAS									
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
8x4		13,20	7+7 ⁽²⁾	18	---	---	---	---	32
T2S1		20,50	7	11	11	---	---	---	29
T2S2		20,50	7	11	18	---	---	---	36
T2Se2		20,50	7	11	11	11	---	---	40
T2S3		20,50	7	11	25	---	---	---	43
T2Se3		20,50	7	11	11 ⁽⁴⁾	18	---	---	47

Fuente: Reglamento Nacional de Vehículos, D.S. N° 058-2003-MTC

Tabla A3.6: Pesos y medidas máximas permitidas (2/2)

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
T3S1		20,50	7	18	11	---	---	36
T3S2		20,50	7	18	18	---	---	43
T3Se2		20,50	7	18	11	11	---	47
T3S3		20,50	7	18	25	---	---	48 ⁽²⁾

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
B3-1		14,00	7	16	---	---	---	23
B4-1		15,00	7+7 ⁽⁵⁾	16	---	---	---	30
BA-1		18,30	7	11	7	---	---	25

Fuente: Reglamento Nacional de Vehículos, D.S. N° 058-2003-MTC

Número de repeticiones de eje equivalentes a 8.2 ton.

El efecto del tránsito se mide en la unidad definida, por AASHTO, como Ejes Equivalentes (EE) acumulados durante el periodo de diseño tomado en el análisis. AASHTO definió como un EE, al efecto de deterioro causado sobre el pavimento por un eje simple de dos ruedas convencionales cargado con 8.2 ton de peso, con neumáticos a la presión de 80 lbs/pulg². Los Ejes Equivalentes (EE) son factores de equivalencia que representan el factor destructivo de las distintas cargas, por tipo de eje que conforman cada tipo de vehículo pesado, sobre la estructura del pavimento.

Para el cálculo del Número de esperado de repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 ton (N₁₈), se debe considerar principalmente a los vehículos que tenga un alto factor equivalente de carga en el pavimento como vehículos pesados (tráiler y semi-trailer), camiones y buses, se desprecia los vehículos ligeros (autos, camionetas, combi, etc.). Así también se debe considerar el año que fue determinado el IMD y las tasas de crecimiento.

Para la guía AASHTO, corresponde al EAL afectado por coeficientes que representan el sentido y el número de carriles que tendrá la vía.

$$N_{18} = FD \times FCarr \times EAL_{(8.2T)}$$

$$EAL_{(8.2T)} = 365 \times (\sum IMD_V \times FEC_V) \times FCa$$

$$FCa = ((1+i)^n - 1)/i$$

Donde:

N₁₈: número esperado de repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 ton en el periodo de diseño

FD: 0.5, corresponde a caminos de dos direcciones por calzada.

FCarr.: 1.0, corresponde a un carril por dirección o sentido.

EAL_(8.2T): número de ejes equivalentes a 8.2 ton por cada tipo de vehículo.

365: número de días del año.

FCa: factor de crecimiento acumulado.

i: tasa de crecimiento de los vehículos.

n: periodo de diseño.

Factor direccional y factor carril

a. Factor Direccional:

Debido a que nuestra calle consta de dos carriles en ambas direcciones, usaremos

Factor direccional = 0.5

b. Factor Distribución Carril:

Debido a que nuestra calle consta de un carril para cada dirección, usaremos

Factor Distribución Carril = 1

Factor de crecimiento acumulado:

Debido a que nuestro diseño está proyectado a un periodo de diseño de 10 años, tomando una tasa de crecimiento vehicular de 3.8%, tenemos:

$$Fca = \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

$$Fc = \frac{(1 + 0.038)^{10} - 1}{0.038}$$

$$Fc = 11.89$$

Para el Cálculo del número de repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 ton (N18) hemos considerado toda la información presentada respecto de tráfico vehicular, donde estamos simplificando la propiedad de N18, en:

$$N_{18} = N^{\circ}veh * 365 * FC * FD * Fcarr * Fca$$

Tabla A3.7: Cálculo de número N18 en el carril de estudio

$$N18 = N^{\circ} Veh \times 365 \times FC \times F.D \times FCarr \times FCa$$

Vehículos		Tráfico		FC	FD	FCarr	F.ca	Nrep de EE _{8.2 tn}
Tipo	Simb.	N° Veh/día	N°Veh/año					
Veh. Ligeros (Autos, combis y camionetas rurales)	VL	1032	376680	0.00	0.5	1.00	11.90	0
Omnibus de dos ejes	B2	93	33945	4.50	0.5	1.00	11.90	909921
Omnibus de tres ejes	B3	0	0	2.63	0.5	1.00	11.90	0
Camiones Unitarios	C2	78	28470	4.50	0.5	1.00	11.90	763160
	C3	33	12045	3.28	0.5	1.00	11.90	235478
	C4	17	6205	2.50	0.5	1.00	11.90	92249
Camiones Acoplados	T3S3	8	2920	4.99	0.5	1.00	11.90	86736
							N18 =	2087543

Fuente: elaboración propia

De la tabla se obtiene:

N18 = 2.087543x10⁶, es el número de repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 ton, expresado en millones.

ANEXO 4

PLANOS

- PLANO DE UBICACIÓN
- PLANO DE SECCIONES TÍPICAS
- PLANO DE UBICACIÓN DE MUESTRAS