



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



**“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DEFLECTOMETRÍA Y  
ENSAYOS DE CBR PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO  
RESILIENTE DE SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES,  
PUNO – TIKUILLACA, 2022”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. EVERD VICTOR PARISUAÑA QUISPE**

**Bach. ADAN RUSELL QUELLO CALLATA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PUNO – PERÚ**

**2023**



## Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DEFLECTOMETRÍA Y ENSAYOS DE CBR PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE**

AUTOR

**PARISUAÑA QUISPE EVERD VICTOR - QUELLO CALLATA ADAN RUSELL**

RECuento de palabras

**39004 Words**

RECuento de caracteres

**184163 Characters**

RECuento de páginas

**168 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**6.9MB**

FECHA DE ENTREGA

**May 22, 2023 11:53 AM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**May 22, 2023 11:55 AM GMT-5**

### ● 14% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 12% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 10% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

V°B°

Firmado digitalmente por CASTILLO  
ARONI Emilio FAU 20145496170 soft  
Motivo: Doy V°B°  
Fecha: 22.05.2023 14:51:55 -05:00

Universidad  
Nacional  
del Altiplano



Firmado digitalmente por CASTILLO  
ARONI Emilio FAU 20145496170 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 22.05.2023 14:52:33 -05:00

Resumen



## DEDICATORIA

*A Dios, por permitirme gozar de su amor puro e incondicional que acompaña todos los días de mi vida, y que siempre me ha brindado fuerzas aún en las dificultades.*

*A mi madre Lourdes, por su amor sincero y apoyo incondicional, a mi padre Javier por sus consejos, templanza e inteligencia, sin duda han sido mi soporte para cumplir este objetivo.*

*A mis hermanas Melany y Katherine por su inspiración, admiración y confianza, las quiero mucho.*

***EVERD VICTOR PARISUAÑA QUISPE***



## DEDICATORIA

*Mi agradecimiento profundo a Dios, por mostrarme el camino correcto, por permitirme gozar de salud y por darme fuerza para poder culminar el presente trabajo.*

*Por supuesto y con mucho afecto va dedicado a mis padres Ulda Callata Tapia y Orlando Quello Tapia, por su amor y su apoyo incondicional quienes siempre fueron mi inspiración en todo momento. No cabe duda que la educación fue la mejor herencia que pudieron darme.*

*A mi hermano Bryan por la confianza y poder contribuir positivamente para llevar a cabo esta difícil jornada.*

**ADAN RUSELL QUELLO CALLATA**



## AGRADECIMIENTOS

*Un agradecimiento eterno a nuestra alma mater, la Universidad Nacional del Altiplano.*

*A la ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL, por haber permitido formarnos en sus aulas, compartiendo ilusiones, anhelos. Con dedicación y esfuerzo permitió alcanzar nuestros sueños.*

*Nuestro agradecimiento y gratitud a los docentes Ingenieros Civiles, que gracias a sus conocimientos profesionales contribuyeron en nuestra formación académica.*

*Agradecer también a nuestro asesor de tesis: Ing. Emilio Castillo Aroni, quien con su sapiencia logró orientarnos, guiarnos durante el proceso de esta jornada, así como su predisposición en todo momento para el desarrollo del presente proyecto de tesis.*

*A mis jurados Ingenieros Cesar Edwin Guerra Ramos, Gino Frank Laque Cordova y Gleny Zoila de la Riva Tapia, por habernos guiado en la realización de nuestro proyecto.*

*A nuestros amigos de la universidad, en particular al código 15-I, por compartir anécdotas durante la vida universitaria.*

**EVERD VICTOR PARISUAÑA QUISPE**

**ADAN RUSELL QUELLO CALLATA**



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

**RESUMEN ..... 17**

**ABSTRACT..... 18**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

**1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 19**

**1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... 20**

1.2.1. Problema general ..... 20

1.2.2. Problemas específicos..... 20

**1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN ..... 20**

1.3.1. Hipótesis general ..... 20

1.3.2. Hipótesis específicas..... 20

**1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO..... 21**

**1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN ..... 22**

1.5.1. Objetivo general ..... 22

1.5.2. Objetivos específicos ..... 22

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

**2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO ..... 23**

2.1.1. Antecedentes internacionales ..... 23

2.1.2. Antecedentes nacionales..... 24



2.1.3. Antecedentes locales.....	26
<b>2.2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>27</b>
2.2.1. Pavimento .....	27
2.2.2. Tipos de pavimentos.....	27
2.2.3. Evaluación de pavimentos .....	31
2.2.4. Tipos de evaluación de pavimentos.....	32
2.2.5. Método de las diferencias acumuladas .....	37
2.2.6. Caracterización física – mecánica .....	39
2.2.7. Deflectometría .....	56
2.2.8. Modelo de Hoog .....	64
2.2.9. Correlación módulo resiliente – CBR .....	67
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
<b>3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>70</b>
3.1.1. Tipo de investigación .....	70
3.1.2. Nivel de investigación .....	70
3.1.3. Diseño de investigación.....	71
3.1.4. Ubicación geográfica del estudio .....	71
3.1.5. Población .....	72
3.1.6. Muestra .....	73
<b>3.2. DESCRIPCIÓN DEL SECTOR EN ESTUDIO.....</b>	<b>74</b>
<b>3.3. TRAMIFICACIÓN DE SECTORES HOMOGÉNEOS .....</b>	<b>76</b>
3.3.1. Metodología de las diferencias acumuladas .....	76
<b>3.4. CARACTERIZACIÓN FÍSICA – MECÁNICA DEL MATERIAL DE SUBRASANTE .....</b>	<b>82</b>
3.4.1. Caracterización física del material de subrasante.....	82
3.4.2. Caracterización mecánica del material de subrasante .....	90



<b>3.5. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE MEDIANTE CBR DE LABORATORIO.....</b>	<b>103</b>
3.5.1. Cálculo del CBR a la densidad natural .....	103
3.5.2. Cálculo del módulo resiliente mediante correlación de CBR .....	104
<b>3.6. DETERMINACIÓN DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN.....</b>	<b>107</b>
3.6.1. Materiales e instrumentos .....	107
3.6.2. Personal .....	111
3.6.3. Procedimiento en campo .....	112
3.6.4. Cálculo de las deflexiones corregidas .....	116
3.6.5. Cálculo de radio de curvatura .....	119
3.6.6. Cálculo de deflexión promedio o media.....	119
3.6.7. Cálculo de la desviación estándar.....	120
3.6.8. Cálculo del coeficiente de variación.....	120
3.6.9. Cálculo de la deflexión característica.....	120
3.6.10. Cálculo de la deflexión admisible .....	122
3.6.11. Gráfico del cuenco de deflexiones .....	123
<b>3.7. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE MEDIANTE EL ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO.....</b>	<b>124</b>
3.7.1. Cálculo del módulo resiliente por el método de Hogg simplificado .....	124
3.7.2. Cálculo del módulo resiliente por el método de hogg riguroso.....	127

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1. RESULTADOS DE LA TRAMIFICACIÓN DE SECTORES HOMEGÉNEOS.....</b>	<b>131</b>
4.1.1. Resumen de sectores homogéneos definidos .....	131
4.1.2. Resumen de puntos de evaluación definidos .....	131
<b>4.2. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICO – MECÁNICO DE LA SUBRASANTE.....</b>	<b>132</b>



4.2.1. Certificados de ensayos realizados al material de subrasante .....	132
4.2.2. Resumen de los resultados de evaluación del material de subrasante mediante ensayos de laboratorio .....	132
<b>4.3. RESULTADOS DEL MÓDULO RESILIENTE MEDIANTE CBR DE LABORATORIO.....</b>	<b>135</b>
4.3.1. Resumen de los resultados de CBR a la densidad natural.....	135
4.3.2. Resumen de los resultados del módulo resiliente correlacionado .....	137
<b>4.4. RESULTADOS DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN .....</b>	<b>137</b>
4.4.1. Resumen de deflexiones corregidas y análisis estadístico .....	138
4.4.2. Gráfico cuenco de deflexiones por sectores homogéneos .....	143
<b>4.5. RESULTADOS DEL MÓDULO RESILIENTE OBTENIDO MEDIANTE EL ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO.....</b>	<b>144</b>
4.5.1. Resumen de resultado del módulo resiliente por método de Hoog .....	144
4.5.2. Resumen de resultados de módulo resiliente por sectores homogéneos .	149
<b>4.6. COMPARACIÓN DE MÓDULO RESILIENTE OBTENIDO MEDIANTE EL ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO Y CORRELACIONES DE CBR. 150</b>	
<b>4.7. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS.....</b>	<b>151</b>
<b>4.8. DISCUSIÓN.....</b>	<b>157</b>
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>162</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>163</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>165</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>170</b>

**ÁREA:** Transportes

**TEMA:** Estimación de módulo de resiliencia

**LINEA DE INVESTIGACION:** Transportes y gestión vial

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 02 de junio del 2023



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Sección típica de pavimentos flexibles .....	30
<b>Figura 2</b>	Sección típica de pavimentos rígidos .....	30
<b>Figura 3</b>	Sección típica de pavimentos semirrígidos.....	31
<b>Figura 4</b>	Textura de la superficie .....	34
<b>Figura 5</b>	Métodos de evaluación estructural .....	35
<b>Figura 6</b>	Vista lateral del equipo .....	42
<b>Figura 7</b>	Medidas del ranurador .....	42
<b>Figura 8</b>	Porción de muestra antes y después de la prueba.....	43
<b>Figura 9</b>	Diagrama de flujo para la clasificación de suelos de grano grueso (más del 50 % retenido en el tamiz n° 200) .....	49
<b>Figura 10</b>	Carta de plasticidad.....	50
<b>Figura 11</b>	Molde cilíndrico para el método C .....	54
<b>Figura 12</b>	Molde CBR, trípode y dial.....	55
<b>Figura 13</b>	Esquema y principio de operación de la viga benkelman.....	58
<b>Figura 14</b>	Configuración geométrica del sistema de carga en ensayos con la viga benkelman.....	60
<b>Figura 15</b>	Esquematización del proceso de medición con la viga benkelman .....	60
<b>Figura 16</b>	Deformada del pavimento y radio de curvatura .....	61
<b>Figura 17</b>	Ubicación geográfica, Puno-Tiquillaca .....	71
<b>Figura 18</b>	Ubicación de tramo, km 46+000 al km 50+000 .....	72
<b>Figura 19</b>	Diagrama de medición de viga benkelman.....	73
<b>Figura 20</b>	Medición de calzada de la carretera Puno - Tiquillaca, km 48+000 .....	75
<b>Figura 21</b>	Medición de ancho de carril en calzada, km 49+000 .....	75
<b>Figura 22</b>	Tramificación de sectores homogéneos por diferencias acumuladas .....	82



<b>Figura 23</b>	Peso de material para contenido de humedad.....	84
<b>Figura 24</b>	Peso de tara con muestra.....	84
<b>Figura 25</b>	Lavado de muestra para el análisis granulométrico.....	86
<b>Figura 26</b>	Ensayo de análisis granulométrico .....	86
<b>Figura 27</b>	Ensayo de L.L. – Aplicación de golpes en la cuchara de casagrande .....	87
<b>Figura 28</b>	Ensayo de L.L. – saturación de las muestras .....	88
<b>Figura 29</b>	Ensayo de L.P. – saturación de las muestras .....	89
<b>Figura 30</b>	Ensayo de L.P. – formación de varillas de suelo .....	89
<b>Figura 31</b>	Ensayo de cono de arena – preparación de la superficie .....	93
<b>Figura 32</b>	Cono de arena – inmersión de la arena en el pozo exploratorio.....	93
<b>Figura 33</b>	Cono de arena – nivelación de la superficie .....	94
<b>Figura 34</b>	Peso específico de la grava – inmersión de la grava en la canastilla.....	96
<b>Figura 35</b>	Peso específico de la grava – registro de peso de grava inmerso en agua..	96
<b>Figura 36</b>	Ensayo de proctor modificado – compactación de la muestra .....	99
<b>Figura 37</b>	Ensayo de proctor modificado – registro de peso de la muestra .....	99
<b>Figura 38</b>	Ensayo de CBR – compactación de la muestra .....	101
<b>Figura 39</b>	Ensayo de CBR – inmersión de la muestra .....	102
<b>Figura 40</b>	Ensayo de CBR – penetración de la muestra.....	102
<b>Figura 41</b>	Cálculo de CBR a la densidad natural de la muestra 01 .....	104
<b>Figura 42</b>	Comparación entre el módulo resiliente – CBR, mecánico empírico .....	105
<b>Figura 43</b>	Módulo resiliente mediante correlación de CBR.....	106
<b>Figura 44</b>	Calibración de la viga benkelman.....	108
<b>Figura 45</b>	Certificado de calibración de la viga benkelman.....	108
<b>Figura 46</b>	Camión de tipo C2 para el ensayo con la viga benkelman .....	109
<b>Figura 47</b>	Medición de la temperatura del pavimento .....	109



<b>Figura 48</b>	Equipos de protección personal (EPPs).....	110
<b>Figura 49</b>	Señalización mediante conos de seguridad.....	111
<b>Figura 50</b>	Personal de trabajo para el ensayo de la viga benkelman.....	111
<b>Figura 51</b>	Distancia desde el borde del pavimento - 0.90m.....	112
<b>Figura 52</b>	Marcación de puntos sobre la viga benkelman.....	113
<b>Figura 53</b>	Ajuste perpendicular de la viga benkelman.....	114
<b>Figura 54</b>	Colocación de la viga sobre el punto de ensayo.....	114
<b>Figura 55</b>	Registro de datos deflectométricos.....	115
<b>Figura 56</b>	Ajuste Perpendicular de la viga benkelman.....	115
<b>Figura 57</b>	Formato para la recopilación de mediciones de campo.....	116
<b>Figura 58</b>	Recopilación de mediciones en campo.....	117
<b>Figura 59</b>	Cuenco de deflexiones del sector homogéneo N°01.....	123
<b>Figura 60</b>	Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> ) Vs CBR (%).....	136
<b>Figura 61</b>	Deflexión promedio y característica por sectores homogéneos.....	142
<b>Figura 62</b>	Radio de curvatura promedio y característico por sectores homogéneos.....	143
<b>Figura 63</b>	Cuenco de deflexiones del km 46+000 al km 50+000.....	144
<b>Figura 64</b>	Comparación de modulo resiliente obtenido por deflectometría y correlación de CBR.....	150
<b>Figura 65</b>	Modelo lineal de regresión de módulo resiliente obtenido por deflectometría y correlación de CBR.....	151
<b>Figura 66</b>	Modelo de dispersión lineal de de la comparación entre el método de hogg simplificado y el método de hogg riguroso.....	154



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b>	Serie de tamices .....	40
<b>Tabla 2:</b>	Peso mínimo aproximado .....	41
<b>Tabla 3:</b>	Clasificación de materiales de carreteras subrasantes, 35% o menos pasante Nº200 .....	45
<b>Tabla 4:</b>	Clasificación de materiales de carreteras subrasantes, más del 35% pasante Nº200 .....	46
<b>Tabla 5:</b>	Método proctor modificado .....	53
<b>Tabla 6:</b>	Clasificación cualitativa del suelo .....	56
<b>Tabla 7:</b>	Distancias Prefijada Desde el Borde.....	59
<b>Tabla 8:</b>	Deflexiones características según tipo de carretera .....	62
<b>Tabla 9:</b>	Ecuaciones para la obtención de parámetros de evaluación .....	65
<b>Tabla 10:</b>	Valor de coeficientes y variables de ajuste de curvas.....	66
<b>Tabla 11:</b>	Coordenadas UTM de inicio y fin del tramo .....	72
<b>Tabla 12:</b>	Número de puntos de muestreo para análisis deflectométrico.....	73
<b>Tabla 13:</b>	Descripción de puntos de evaluación para ensayos de laboratorio y densidad natural .....	74
<b>Tabla 14:</b>	Número de puntos de evaluación por sectores homogéneos .....	74
<b>Tabla 15:</b>	Cálculo de valores $Z_x$ por el método de diferencias acumuladas de la AASHTO 93 .....	78
<b>Tabla 16:</b>	Ensayos de laboratorio para la caracterización física de subrasante.....	83
<b>Tabla 17:</b>	Resultados de contenido de humedad natural de la muestra de suelo .....	83
<b>Tabla 18:</b>	Resultados de Análisis Granulométrico - % que pasa .....	85
<b>Tabla 19:</b>	Resultados de Límite Líquido .....	87
<b>Tabla 20:</b>	Resultados de índice de plasticidad .....	88



<b>Tabla 21:</b> Resultados de tipo de suelo según SUCS y AASHTO .....	90
<b>Tabla 22:</b> Ensayos de laboratorio para la caracterización mecánica .....	91
<b>Tabla 23:</b> Resultados de la densidad de campo sin corrección por sobre tamaño .....	92
<b>Tabla 24:</b> Resultados de la densidad de campo con corrección por sobre tamaño .....	95
<b>Tabla 25:</b> Cálculo del método C para el ensayo de proctor modificado .....	97
<b>Tabla 26:</b> Resultados de optimo contenido de humedad y máxima densidad seca.....	98
<b>Tabla 27:</b> Resultado de CBR de 4 muestras ensayadas.....	101
<b>Tabla 28:</b> Lecturas de dial de campo para la progresiva km 46+000.....	118
<b>Tabla 29:</b> Deflexiones corregidas y radio característico del sector homogéneo N°01 .....	121
<b>Tabla 30:</b> Módulo resiliente (Esg) y CBR (%) para el sector homogéneo N° 01 .....	126
<b>Tabla 31:</b> Resumen de sectores homogéneos.....	131
<b>Tabla 32:</b> Resumen de puntos de evaluación para ensayos de laboratorio y densidad natural .....	132
<b>Tabla 33:</b> Resumen general de la caracterización física - mecánica del material de subrasante.....	133
<b>Tabla 34:</b> Resumen de los ensayos de CBR a la densidad natural.....	136
<b>Tabla 35:</b> Resumen de Módulo Resiliente correlacionado .....	137
<b>Tabla 36:</b> Resumen de deflexiones corregidas y radio de curvatura.....	138
<b>Tabla 37:</b> Resumen ponderado de deflexiones y radio característico por sectores homogéneos .....	142
<b>Tabla 38:</b> Resumen de resultados de Módulo resiliente por método de Hogg.....	145
<b>Tabla 39:</b> Resumen estadístico descriptivo de Módulo Resiliente (kg/cm <sup>2</sup> ).....	149
<b>Tabla 40:</b> Resumen de resultados de Módulo Resiliente por sectores homogéneos..	149



<b>Tabla 41:</b> Comparación de Módulo Resiliente obtenido por deflectometría y correlación de CBR.....	150
<b>Tabla 42:</b> Prueba de normalidad entre el método de hogg simplificado y el método de hogg riguroso .....	152
<b>Tabla 43:</b> Prueba de hipótesis entre el método de hogg simplificado y el método de hogg riguroso .....	153
<b>Tabla 44:</b> Prueba de normalidad entre el módulo resiliente por deflectometría y módulo resiliente por correlación de CBR.....	155
<b>Tabla 45:</b> Prueba de hipótesis entre el módulo resiliente por deflectometría y módulo resiliente por correlación de CBR.....	156



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

<b>AASHTO</b>	: American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing and Materials
<b>CBR</b>	: Californian Bearing Ratio
<b>EG</b>	: Especificaciones Generales
<b>FWD</b>	: Falling Weight Deflectometer
<b>IMDA</b>	: Índice Medio Diario Anual
<b>IP</b>	: Índice de Plasticidad
<b>IRI</b>	: Índice de Rugosidad Internacional
<b>LL</b>	: Límite Líquido
<b>LP</b>	: Límite Plástico
<b>MDS</b>	: Máxima Densidad Seca
<b>MEPDG</b>	: Mechanistic Empirical Pavement Design Guide
<b>MTC</b>	: Ministerio de Transportes y Comunicaciones
<b>NP</b>	: No Plástico
<b>OCH</b>	: Óptimo Contenido de Humedad
<b>PCI</b>	: Pavement Condition Index
<b>SM</b>	: Silty Sand
<b>SUCS</b>	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
<b>TSB</b>	: Tratamiento Superficial Doble
<b>UTM</b>	: Universal Transverse Mercator



## RESUMEN

En nuestro país, uno de los parámetros más importantes para el diseño y evaluación de pavimentos es el módulo resiliente de subrasante; frente a ello, surge la necesidad de evaluar y validar métodos alternativos que sean versátiles y de bajo costo para su estimación, en ese sentido, la presente investigación tiene como objetivo determinar la confiabilidad de la metodología del Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman respecto a los ensayos de CBR, para estimar el Módulo Resiliente de la subrasante del sector km 46+000 al 50+000 de la carretera Puno-Tiquillaca. La investigación es de tipo aplicado y de nivel descriptivo – correlacional, el diseño de investigación es no experimental. Para determinar la ubicación y el número de puntos de evaluación se efectuó la metodología de las diferencias acumuladas encontrándose 04 sectores homogéneos. Se realizó el cálculo del módulo resiliente mediante las correlaciones de los ensayos de CBR y la metodología del Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman; para este último se utilizó el Modelo de Hogg Simplificado; todo ello, a fin de comparar los resultados de las dos metodologías. Se concluye que, existe una “correlación positiva muy alta” entre el Módulo Resiliente obtenido por Análisis de Deflectometría y el obtenido por correlaciones de los ensayos de CBR, el grado de correlación de Pearson es de 0.927 para un nivel de confianza del 90%, el coeficiente de determinación es de 85.9%; por lo que, el modelo lineal obtenido, es fiable para mediciones futuras en pavimentos de bajo volumen de tránsito; carreteras de segunda o tercera clase por su nivel de confiabilidad, que contengan las características físicas particulares de la subrasante ensayada.

**Palabras Clave:** Módulo Resiliente, Subrasante, CBR, Deflectometría, Modelo de Hogg Simplificado.



## ABSTRACT

In our country, one of the most important parameters for the design and evaluation of pavements is the resilient modulus of subgrade; Faced with this, the need arises to evaluate and validate alternative methods that are versatile and low cost for their estimation, in this sense, the present investigation aims to determine the reliability of the Benkelman Beam Deflectometry Analysis methodology with respect to the CBR tests, to estimate the Resilient Modulus of the subgrade of the sector km 46+000 to 50+000 of the Puno-Tiquillaca highway. The research is of an applied type and of a descriptive-correlational level, the research design is not experimental. To determine the location and number of evaluation points, the methodology of accumulated differences was carried out, finding 04 homogeneous sectors. The resilient modulus was calculated using the correlations of the CBR tests and the Benkelman Beam Deflectometry Analysis methodology; for the latter, the Simplified Hogg Model was captured; all this, in order to compare the results of the two methodologies. It is concluded that there is a "very high positive correlation" between the Resilient Modulus obtained by Deflectometry Analysis and that obtained by correlations from the CBR tests, Pearson's degree of connection is 0.927 for a confidence level of 90%, the determination coefficient is 85.9%; Therefore, the linear model obtained is reliable to detect future pavements with low traffic volume. second or third class roads due to their level of reliability, containing the particular physical characteristics of the tested subgrade.

**Keywords:** Resilient modulu, Subgrade, CBR, Deflectometry, Simplified Hogg Model.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los parámetros más importantes en el diseño y evaluación de pavimentos es el Módulo Resiliente (Mr) o Elástico del material, cuya obtención es de relevancia para representar de una mejor manera las condiciones de esfuerzo – deformación de la subrasante de una carretera.

Como resultado de muchas investigaciones en el mundo se han desarrollado técnicas y equipos para la determinación del Módulo Resiliente (Mr), dentro de las cuales se mencionan de acuerdo a su confiabilidad: las pruebas triaxiales dinámicas, las pruebas de campo no destructivas con el equipo deflectómetro de impacto FWD y correlaciones con el CBR entre las más utilizadas.

En nuestro país, mayormente se emplea las correlaciones de CBR que implican roturas en la vía y el equipo deflectómetro de impacto FWD cuya ejecución representa un alto costo y acceso a este equipo tecnológico. Frente a ello surge la necesidad de evaluar la estimación del Módulo Resiliente (Mr) mediante equipos versátiles, económicos, disponibles y al alcance de cualquier régimen de gobierno, como es el uso de la Viga Benkelman que, con la ayuda del cuenco de deflexiones in situ y ensayos geotécnicos (CBR) para validación y comparación, puede estimar confiablemente el módulo de la subrasante mediante el empleo del Modelo de Hogg Simplificado y un análisis de deflectometría que se conoce como Retro cálculo ó Retro análisis, el mismo que busca representar teóricamente las deflexiones alcanzadas en campo que produce ciertas aplicaciones de carga estática, reduciendo de esa manera las pruebas destructivas y los altos costos que implican los demás métodos para la estimación del Módulo Resiliente (Mr) de la subrasante de una carretera.



## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema general**

¿Cuál es el nivel de confiabilidad del Análisis de deflectometría con Viga Benkelman respecto a los ensayos de CBR, para estimar el Módulo Resiliente de una subrasante de un Pavimento Flexible en la carretera Puno – Tiquillaca, 2022?

### **1.2.2. Problemas específicos**

¿Cómo se determina el Módulo Resiliente de una subrasante mediante el Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman a partir del modelo matemático de Hogg Simplificado?

¿Cómo se determina la caracterización Físico – Mecánica existente de la Subrasante mediante ensayos Geotécnicos?

¿Cuál es la correlación que existe del módulo resiliente ( $M_r$ ) de la Subrasante obtenido a través del Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman y Ensayos de CBR?

## **1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1. Hipótesis general**

El Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman permite obtener un valor confiable respecto a los ensayos de CBR, en la estimación del Módulo Resiliente de una Subrasante de un Pavimento Flexible en la carretera Puno – Tiquillaca, 2022.

### **1.3.2. Hipótesis específicas**

Es posible determinar el Módulo Resiliente de una subrasante mediante el Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman a partir del Modelo Matemático de Hogg Simplificado.

Al realizar los ensayos geotécnicos se determina la caracterización Físico - Mecánica existente de la Subrasante.



Existe una correlación del módulo resiliente ( $M_r$ ) de la Subrasante obtenido a través del Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman y Ensayos de CBR.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

En el Perú, para estimar el módulo resiliente generalmente se utiliza las correlaciones de CBR, puesto que su determinación directa mediante pruebas triaxiales dinámicas y ensayos con el deflectómetro de impacto FWD implican un alto costo económico y gran manejo de datos, así mismo, las investigaciones internacionales están más orientadas a buscar correlaciones entre el módulo resiliente retro calculado con el equipo deflectómetro de impacto FWD y el módulo resiliente de laboratorio, cuyo objetivo es encontrar el factor de ajuste (C) que desarrolla la metodología AASHTO en diferentes tipos de estructura de pavimentos para ser utilizado en el diseño y evaluación de pavimentos, que sin embargo, en nuestro país se ha encontrado poco desarrollado dada la complejidad y altos costos que implica el equipo deflectométrico FWD.

Ante este contexto, se justifica la necesidad de evaluar y calificar en nuestro medio con los equipos de fácil disponibilidad y manejo, la determinación del módulo de la subrasante mediante el análisis de deflectometría con uso de la Viga Benkelman, en una carretera de mediano a bajo volumen de tránsito, cuya validación y comparación se realice con ensayos geotécnicos (CBR), con ciertas características específicas de pavimento y condiciones físicas particulares de densidad seca y contenido de humedad de la subrasante del lugar, minimizando de esa manera tiempo y costos, reduciendo los procedimientos destructivos que impliquen la rotura de la vía y la extracción de la muestras de campo, de esta manera se justifica el aporte y originalidad de esta investigación.



## **1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. Objetivo general**

Determinar la confiabilidad del Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman respecto a los ensayos de CBR, para estimar el Módulo Resiliente de una Subrasante de un Pavimento Flexible en la carretera Puno – Tiquillaca, 2022.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

Determinar el Módulo Resiliente de una subrasante mediante el Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman a partir del Modelo Matemático de Hogg Simplificado

Determinar la caracterización Físico – Mecánica existente de la Subrasante mediante ensayos Geotécnicos.

Determinar la correlación que existe del módulo resiliente ( $M_r$ ) de la Subrasante obtenido a través del Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman y Ensayos de CBR.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Con la finalidad de enmarcar la investigación, se verificó investigaciones realizados sobre el tema a nivel global, nacional y local. Los trabajos siguientes son de suma relevancia para la presente investigación ya sean por las metodologías que han empleado y los resultados obtenidos.

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales

(Soto Salgado & Soruco Paravicini, 2017), En su estudio de investigación plantean como objetivo realizar un análisis de deformaciones mediante un estudio de comparación de resultados del Módulo resiliente determinados mediante Viga Benkelman comparando con valores determinados del CBR obtenidos a través de ensayos de laboratorio.

En la investigación se concluye que: La diferencia entre una metodología y otra se indica estableciendo una relación entre los resultados adquiridos tanto por deflectometría como en laboratorio que varían de 0,02 a 5,89%, siendo los resultados de laboratorio mayores a comparación de la deflectometría. La carga vehicular cíclica y continua produce deformaciones en las vías, el cual no se representa de la misma manera en el laboratorio. En cambio, como el ensayo de deflectometría se realiza sobre el terreno y con una carga real que recorre la estructura del pavimento, los resultados son más reales, aunque sigue siendo importante tener en cuenta los diversos elementos que pueden afectar a este método.

(Lugo Lopez & Villanueva Diaz, 2018), realizaron su trabajo de investigación con el objetivo de utilizar el deflectómetro de impacto y pruebas de laboratorio, así poder examinar la variabilidad de resistencia entre una subrasante natural y una subrasante



consolidada causada por el tráfico, hace mención a la problemática que, en los proyectos viales para el diseño de pavimentos, para eludir dañar el pavimento existente con perforaciones adicionales provocados por las pruebas, éstas se realizan en laboratorio de las zonas circundantes al tramo de carretera que se va a construir. De este modo, se evalúa la subrasante natural y no la que ha sido modificada por la carga vehicular repetitiva. Este enfoque ayuda a prevenir los daños en el pavimento, pero ignora el hecho de que el suelo en su estado natural tiene propiedades físicas y mecánicas distintas de las del suelo que ha sido previamente pavimentado y expuesto a las cargas de tráfico de la zona, donde concluyen que al efectuar las pruebas correspondientes de la subrasante natural y las que fueron sometidas bajo la acción de cargas vehiculares, se determinó que la subrasante sometida a cargas vehiculares mejoró en 0.15% desde la fecha que se instaló el paquete estructural hasta la fecha que se toma las muestras, ello implica que las partículas se consolidaron, resultando un comportamiento más eficiente, por otro lado señala que los resultados por retro cálculo para el MR son susceptibles a la temperatura ambiente, encontrando que los factores de ajuste determinados afectan sobre el comportamiento del paquete estructural.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

(Rodríguez Noriega, 2020), Elaboró su investigación con el objetivo de utilizar la guía AASHTO 1993 para evaluar el módulo de resiliencia del suelo de fundación de la carretera basándose en la deflectometría y la geotecnia con el fin de optimizar los diseños y los costos, y en uno de sus objetivos específicos considera que para desarrollar o establecer una correlación fiable del suelo de fundación, es necesario calcular el módulo de resiliencia utilizando pruebas CBR eficientes en el laboratorio y pruebas deflectométricas. Las principales diferencias entre los resultados de los dos enfoques se desprenden de ello a pesar de que las bibliografías y los espacios técnicos confirman que



los resultados de la deflectometría y de los diseños geotécnicos deberían ser similares, así también, hace mención a la problemática que para el cálculo del módulo resiliente se utilizan dos métodos: el método de la cámara triaxial dinámica, que es el método directo, y el otro método mediante correlaciones con otras pruebas de laboratorio y de campo, entre ellas la deflectometría y las pruebas geotécnicas. Asimismo, se realiza un análisis en referencia a las diferencias entre uno y el otro método en los pavimentos reciclados.

El estudio concluye que: El costo de la deflectometría es menor que el de la geotecnia porque el espesor del paquete estructural diseñado por deflectometría es menor que el diseñado por geotecnia. Esto demuestra que el módulo resiliente calculado por geotecnia es mayor que el obtenido por deflectometría, y la correlación entre las dos variables se califica como una asociación alta, lo que significa que el  $M_r$  por la geotecnia aumenta, el  $M_r$  retro calculado también tiende a crecer.

(Balarezo Zapata, 2017), Elaboró su trabajo con el objetivo de dar a entender la capacidad estructural con Viga Benkelman como primer paso de un programa de conservación para los gobiernos locales, resalta que dicha evaluación mostrará el estado del pavimento en términos de factores de la subrasante, es decir se determinará su módulo de elasticidad ( $E_{sg}$ ) y su CBR, y en su planteamiento del problema menciona que normalmente se solicita excavación de pozos para tomar especímenes para los ensayos en laboratorio, resultando caro, lento y es “destructivo”. La evaluación estructural mediante Viga Benkelman, es una prueba “no destructiva”, es decir no interviene directamente en el paquete estructural del pavimento con ensayos destructivos; el modelo al que hace referencia menciona que está basado en el hecho de que las curvas de deflexión contienen una gran cantidad de información sobre las propiedades del pavimento y su subrasante. La conclusión a la que llega fue, la evaluación estructural del pavimento usando equipos de análisis de deflectometría como la Viga Benkelman ayuda



a disponer y cuantificar una necesidad de rehabilitación cuando un pavimento presenta un proceso de deterioro, cuando el pavimento está llegando a su tiempo final de vida útil presentando un conjunto de fallas o cuando se va a cambiar su función para prolongar su vida útil, en ese entender, los gobiernos locales deberían de tener como primera elección de valoración o evaluación a la Viga Benkelman.

### **2.1.3. Antecedentes locales**

(Bonifacio Durant, 2022), Su investigación tiene como objetivo evaluar la capacidad estructural para soportar cargas de tránsito del pavimento flexible, así como también determinar la deflexión característica y admisible del pavimento flexible, hace mención la problemática que las carreteras a nivel nacional raramente son evaluadas por alguna metodología, en la mayoría de los sucesos se toma acción cuando el deterioro es visible, situación que refleja la carencia o poca gestión de pavimentos de los gobiernos locales y/o regionales. Al respecto, en algunos casos, cuando la carretera tiene un nivel significativo de tránsito, se practica solo una evaluación superficial, esto es aceptable cuando el daño percibido es leve o las fallas sucedidas en los pavimentos no son del tipo estructural; pero, cuando la causa principal del deterioro es la deficiencia estructural del pavimento por el aumento del tránsito vehicular y/o capacidad de soporte de la capa subrasante, se requiere necesariamente una evaluación del tipo estructural. Finalmente, el estudio concluye que:

Del cálculo de deflexiones mediante el ensayo MTC -1002 “Medida de la deflexión de un pavimento flexible empleando la Viga Benkelman”; la deflexión característica resulto ser menor a la deflexión admisible (aquella que alcanza el pavimento al final de su vida útil) y el radio de curvatura es superior a ochenta (80) metros; lo que indica que la conducta de la estructura del pavimento y la subrasante son buenos, así como también el comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Atuncolla –



Complejo Arqueológico Sillustani es “bueno”, conforme a los parámetros de deflexión y radio de curvatura; sin embargo, al existir patologías presentes en el tramo en estudio, corresponde corregir las fallas de origen superficial.

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Pavimento**

El pavimento es un paquete estructural cuya finalidad es soportar cargas, esfuerzos por acción de cargas vehiculares durante toda su vida útil.

Según el (MTC, 2014), menciona que el pavimento es una estructura con varias capas construida sobre la subrasante de la carretera para transmitir y resistir las fuerzas generadas por los vehículos, y mejorar la seguridad, comodidad y confort del usuario.

Así mismo se menciona que: Son una colección de capas que se superponen de forma relativamente horizontal, las cuales están diseñadas y construidas de acuerdo a los materiales adecuados y apropiada compactación (Montejo Fonseca, 1998, p. 1).

Considerar también que este debe brindar comodidad, seguridad y confort cuando se circule sobre el pavimento. Considerando un servicio de calidad, suficiente resistencia al deslizamiento, niveles adecuados de reflexión de la luz y bajo nivel de ruido (Medina Palacios & de la Cruz Puma, 2015, p. 10).

### **2.2.2. Tipos de pavimentos**

Son los siguientes: Flexibles, Semirrígidos (o también intertrabados) y Pavimentos Rígidos (MTC, 2014).

A continuación, definiremos los tipos de pavimentos, considerando de mayor interés en los pavimentos flexibles por ser objeto de la presente investigación.

#### **2.2.2.1. Pavimentos flexibles**

Son a aquellos pavimentos que tienen una capa de rodadura constituido por concreto de cemento asfáltico. Estos pavimentos transmiten cargas desde la carpeta de



rodadura hasta la subrasante, teniendo en cuenta que el asfalto sirve más como un transmisor, ya que no absorbe completamente las cargas vehiculares (Becerra Salas, 2012, p. 5).

El pavimento flexible está compuesto por la subbase, base (denominadas capas granulares) y capa de rodadura bituminosa como aglomerante. Asimismo, dentro de las principales alternativas para la capa asfáltica se encuentra el mortero asfáltico, el micro pavimento, el macadán asfáltico, el tratamiento superficial bicapa TSB, tratamiento superficial monocapa, mezclas asfálticas en frío y las mezclas asfálticas (MTC, 2014).

Por lo general presenta las siguientes capas: Carpeta de Rodadura, Base y Subbase; así como también sus funciones en un pavimento flexible.

- **Capa de Rodadura:** Debe ofrecer una superficie homogénea de tal forma que pueda soportar las cargas de tránsito vehicular. Impermeabilidad, en la medida posible debe evitar que el agua filtre al interior del pavimento. Por otro lado, su resistencia a la tensión se suma la resistencia estructural del pavimento (Montejo Fonseca, 1998).

Por otro lado, la carpeta asfáltica es la capa superficial de un pavimento, que puede estar hecho de adoquines, de cemento portland (rígido) o de tipo bituminoso (flexible), cuyo propósito es soportar las cargas del tránsito vehicular (MTC, 2014).

- **Subbase:** Generalmente son capas de espesor menor que las capas superiores, y de materiales poco calificadas, en ese sentido son más económicas. Compuesto por una capa de transición, encargada de bloquear el flujo de los finos de la capa de subrasante a la capa de base. En el nivel de esta capa las deformaciones son menores a comparación de la capa base, asimismo cumple la función de obstruir cambios que se puedan producir en la subrasante hacia la carpeta asfáltica. Asimismo, es resistente, obstruye que los esfuerzos en la capa superior superen los valores permisibles de la

subrasante. Drenaje, priva la ascensión capilar y también el flujo de agua introducido a través de la superficie o bermas (Montejo Fonseca, 1998, p. 4).

El (MTC, 2014), menciona que es una capa que sostiene a la base y a la capa de rodadura considerando que tiene un espesor de diseño de material especificado. Además, controla la ascensión capilar, y se utiliza como capa de drenaje. Esta capa puede ser necesaria o no, dependiendo del tipo, diseño y dimensiones del pavimento. La capa puede ser de material granular ( $CBR \geq 40\%$ ) o tratada con cemento, cal o asfalto.

- **Base:** Económica, de la misma forma que la subbase de espesores menores que la capa superior y por consiguiente su costo más barato, así como. Resistencia, su propósito principal es ofrecer un elemento resistente que sea capaz de transmitir adecuadamente los esfuerzos o cargas a las capas de subbase y subrasante (Montejo Fonseca, 1998, p. 4).

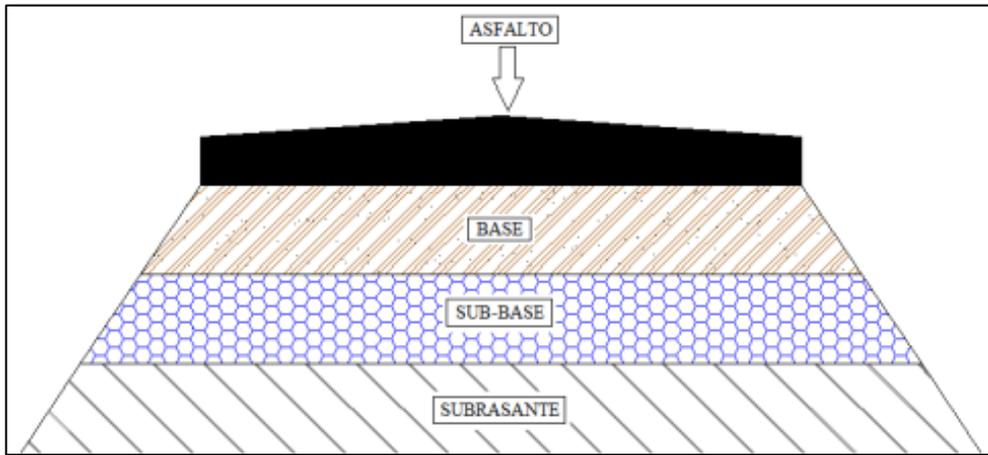
El (MTC, 2014), define como la capa debajo de la carpeta de rodadura y es el principal responsable de soportar, sostener y transmitir las cargas de tráfico vehicular. Según la norma esta capa es de material granular drenante o tratada con elementos como la cal, asfalto o cemento.

- **Subrasante:** Es un componente que forma parte de la infraestructura vial, se crea sobre el suelo natural y sirve de soporte directo del pavimento. Compuesto por suelos seleccionados que cumplen con parámetros aceptables. Los suelos por debajo del nivel de subrasante deben ser suelos aceptables con  $CBR \geq 6\%$  en una profundidad que no exceda los 0.60m, caso contrario se realiza estabilizaciones (MTC, 2014).

De la calidad de esta capa influye mucho en el espesor del pavimento ya sea flexible o rígido. El factor de evaluación de la capa de subrasante es la resistencia a la

deformación que se produce principalmente por el tráfico vehicular (Montejo Fonseca, 1998, p. 9).

**Figura 1**  
*Sección típica de pavimentos flexibles*



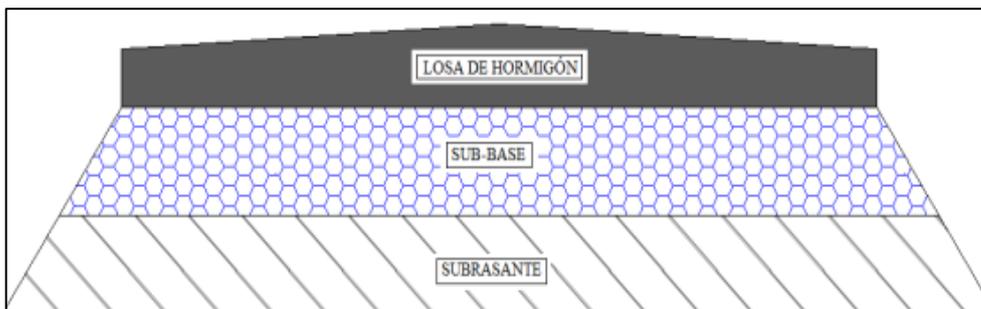
*Fuente:* (Medina Palacios & de la Cruz Puma, 2015, p. 11)

#### 2.2.2.2. Pavimentos rígidos

Son aquellos que contienen una capa de rodadura de concreto de cemento hidráulico. Debido a que las características de la capa de concreto que disipa o permiten una mayor absorción de las solicitaciones de cargas vehiculares, se le conoce como pavimento rígido (Becerra Salas, 2012, p. 6).

Se define también, como una capa de base granular o puede estabilizarse con cemento, asfalto o cal. Por otro lado, se caracteriza como estructura conformada principalmente de una capa de subbase granular (MTC, 2014).

**Figura 2**  
*Sección típica de pavimentos rígidos*

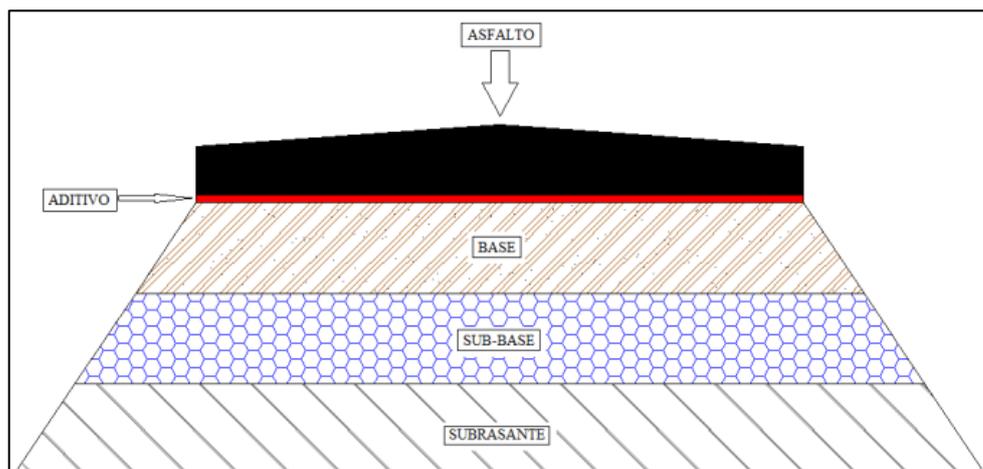


*Fuente:* (Medina Palacios & de la Cruz Puma, 2015, p. 10)

### 2.2.2.3. Pavimentos semirrígidos

Principalmente se le denomina de esa manera a los pavimentos adoquinados o también llamados intertrabados, así como también pavimentos que están compuestos por capas asfálticas de material bituminoso sobre bases granulares que pueden ser estabilizadas con cemento, cal (MTC, 2014).

**Figura 3**  
*Sección típica de pavimentos semirrígidos*



*Fuente:* (Medina Palacios & de la Cruz Puma, 2015, p. 11)

### 2.2.3. Evaluación de pavimentos

Se anticipa la falla de un pavimento al final de su vida útil ya que es una de las pocas estructuras civiles con un periodo de vida útil finito. Por lo cual, significa que a lo largo de su vida útil, la estructura del pavimento comenzará a deteriorarse, lo que resulta en un conjunto o serie de fallas que disminuirán la calidad de rodaje y, en última instancia, aumentarán los costos de mantenimiento por parte de la agencia responsable, así como también del usuario (Corros B. et al., 2009, p. 1), es por el cual es necesario poder adoptar las debidas medidas de conservación y mantenimiento, con las que se pretende alargar la vida útil del pavimento, es necesario realizar la evaluación de los pavimentos, lo que conlleva un estudio en el que se determina el estado de la estructura y superficie del pavimento. En este sentido, es de suma importancia elegir y realizar una evaluación

objetiva y acorde con el entorno en el que se ubica (Leguía Loarte & Pacheco Risco, 2016, p. 35).

#### **2.2.4. Tipos de evaluación de pavimentos**

Se precisa a aquellos tipos de evaluación. En muchos casos es posible comparar los resultados de varias pruebas entre sí para poder validar las causas o razones que originaron el deterioro o falla y, en consecuencia, comprender mejor el comportamiento del pavimento (Leguía Loarte & Pacheco Risco, 2016, p. 36).

Para ello se define estudios superficiales, funcionales y estructurales lo cual se detalla a continuación:

##### **2.2.4.1. Evaluación superficial del pavimento**

Se denomina al estado superficial de la carretera llevando a cabo una inspección visual en todo su entorno, comprendiendo este último a cualquier tipo de obras relacionadas con el pavimento que pueda afectar en la comodidad y seguridad del usuario, ya sea de forma directa o indirectamente (Montejo Fonseca, 1998, p. 508).

Se tiene un método considerando este un procedimiento para determinar la condición superficial del pavimento.

- **Método Pavement Condition Index (PCI):** Su objetivo es determinar el índice de integridad del pavimento y la condición de la superficie en cuanto a serviciabilidad se refiere. Es un método que puede ser utilizado tanto para pavimentos flexibles como rígidos, los resultados de la evaluación permiten determinar el mantenimiento y reparación que requieren los pavimentos (Tacsá Herrera & Rodríguez Paez, 2018, p. 31). Tener en consideración que el PCI no puede evaluar la resistencia estructural del pavimento, y tampoco facilita en forma directa el coeficiente de resistencia a la fricción o también llamada rugosidad general (ASTM, 1999, p. 2).



Los resultados de un inventario visual del estado del pavimento, que establece la CLASE, SEVERIDAD y CANTIDAD de cada daño, se utilizan para calcular el PCI. PCI fue creado con el fin de obtener un indicador de la integridad estructural del pavimento y su estado operacional de la superficie del pavimento. Los datos de daños recopilados durante el inventario brindan una comprensión clara de las causas del daño y su relación con las cargas vehiculares, la temperatura, clima o intemperie (Vásquez Varela, 2002, p. 2).

#### ***2.2.4.2. Evaluación funcional del pavimento***

El objetivo de la evaluación funcional del pavimento es identificar las fallas que se relacionan principalmente con la calidad de la superficie y el estado general del pavimento, teniendo en cuenta todos los elementos que tienen un impacto negativo en la serviciabilidad, comodidad, confort, seguridad y economía del usuario (Thenoux Z. & Gaete P., 1995, p. 2).

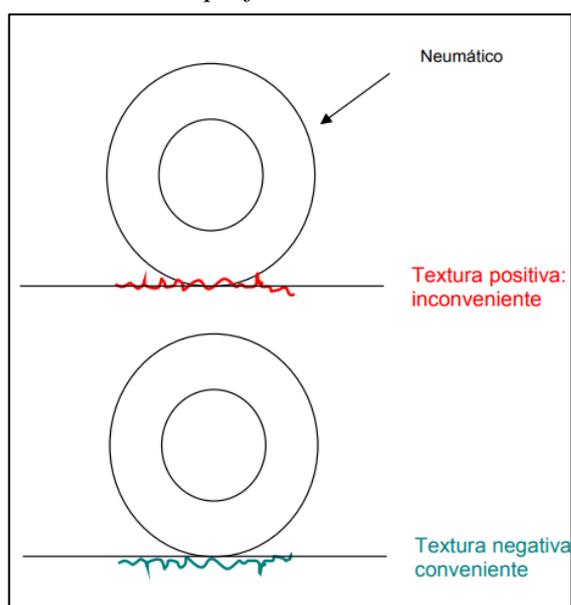
Entre las deficiencias tenemos: la rugosidad, fallas superficiales, resistencia al deslizamiento, costo del usuario, impacto ambiental.

- **Rugosidad:** Se describen como irregularidades en la superficie de la estructura del pavimento que tienen un impacto negativo a la calidad de rodado de los vehículos, y por lo tanto su serviciabilidad brindada al tránsito. Para la medida corresponde al Índice de Rugosidad Internacional (Thenoux Z. & Gaete P., 1995).
- **Fallas Superficiales:** Son fallas que son visibles en la superficie del pavimento y se pueden medir sin el uso de herramientas especializadas. Estos defectos tienen una importancia relativa en la serviciabilidad del pavimento, por otro lado, la detección rápida es primordial para evitar la posibilidad de acelerar el deterioro y/o establecer un diagnóstico más exacto de las causas del deterioro de la superficie de la estructura (Thenoux Z. & Gaete P., 1995, p. 2).

- **Resistencia al Deslizamiento:** En dirección en la que se mueve el automóvil. Ocurre cuando se aplica un esfuerzo de frenado. En la resistencia al deslizamiento se compone principalmente en dos elementos: (a) el rozamiento por adherencia neumático-pavimento y (b) la pérdida de energía debido a la histéresis de la rueda, lo que significa que la rueda no absorbe toda la energía aplicada; siempre hay pérdida de energía que se convierte en "calor", esto sucede con materiales elásticos como el caucho (Corros B. et al., 2009, pp. 5–1).
- **Costo del Usuario:** Contempla a la economía relacionando a los costos de operación del vehículo, considerando en estos los costos de consumo de mantenimiento, consumo de combustible, neumáticos, entre otros. Por otro lado, los costos de tiempo de viaje por el usuario.
- **Impacto Ambiental:** Referidos al ruido en el contacto Neumático – Pavimento, por lo cual es necesario que la textura de la superficie sea negativa, quiere decir que la amplitud de la onda debe darse de la superficie de rodamiento en dirección negativa (Corros B. et al., 2009, pp. 5–49).

**Figura 4**

*Textura de la superficie*



*Fuente:* (Corros B. et al., 2009, pp. 5–50)

### 2.2.4.3. Evaluación estructural del pavimento

Esta evaluación tiene por objeto el análisis y estimación de la capacidad estructural del pavimento, en ese sentido, proporciona elementos de juicio para la evaluación de las fallas observadas a fin de determinar acciones de mantenimiento, mejoramiento y/o rehabilitación, por otro lado, determina la capacidad estructural remanente del pavimento. La falta de capacidad estructural de un pavimento conduce en a un deterioro gradual y constante que se manifiesta en grados excesivos de agrietamientos y deformaciones permanentes (Thenoux Z. & Gaete P., 1995, p. 4). Se debe suministrar la información necesaria de las causas que originaron la falla del pavimento (Corros B. et al., 2009, p. 6).

Para verificar la capacidad estructural remanente del pavimento existen distintos medios o métodos, los cuales se pueden clasificar según sea la metodología a utilizar. A continuación, se presenta un esquema de clasificación de los métodos de evaluación estructural (Thenoux Z. & Gaete P., 1995, p. 4).

**Figura 5**  
*Métodos de evaluación estructural*



Fuente: Adaptación (Thenoux Z. & Gaete P., 1995, p. 18)



Las condiciones estructurales se pueden establecer o determinar usando dos métodos, los cuales se menciona a continuación:

**a) Métodos no Destructivos:**

Denominados así, por que permiten investigar la capacidad estructural actual de un pavimento sin tener de intervenir este en ningún lugar, en otras palabras, sin tener que alterar la estructura. Entre los métodos no destructivos, se reconocen dos o clases: Medidas de Deflexión y Evaluaciones Empíricas - vida remanente (Thenoux Z. & Gaete P., 1995, p. 5).

- **Medidas de Deflexión:** Basado en el uso de equipos especializados que operan bajo sollicitaciones estáticas o dinámicas, de tal forma que se basa en producir deformaciones elásticas o deflexiones en la estructura del pavimento (Thenoux Z. & Gaete P., 1995, p. 5). Por otro lado, se tiene una serie de equipos capaces de medir deflexiones, siendo entre los más importantes la Viga Benkelman, Deflectómetro de Lacroix y Falling Weight Deflectometer (FWD) (Montejo Fonseca, 1998, p. 519).
- **Evaluaciones Empíricas (Vida Remanente):** Para evaluar la vida remanente se deben determinar, el tránsito que ha soportado el pavimento desde la última puesta en servicio a la fecha que se evalúa estructuralmente el pavimento, por otro lado, este método no es recomendable por motivos de incertidumbre del cálculo del tránsito vehicular acumulado, asimismo, el estudio se relaciona a la pérdida de capacidad estructural del pavimento con las sollicitaciones de tránsito reales acumuladas (Thenoux Z. & Gaete P., 1995, p. 5).

**b) Métodos Destructivos:**

Esta técnica es lenta, cara, altera la estructura del pavimento al perforar y es destructiva, lo que produce variaciones físicas en los materiales.

En este caso la evaluación destructiva se refiere la destrucción del pavimento a través de la excavación de un pozo de muestreo y prueba in situ de los materiales del pavimento (López Estrada & Mendoza Diaz, 1998, p. 11).

Por otro lado, se menciona que: El pavimento actual tiende a alterarse o modificarse en algún punto para la ejecución de estas pruebas. La excavación de pozos es una las pruebas destructivas más utilizadas para evaluar la capacidad de soporte de la estructura existente, así como también la extracción de testigos, placa de carga, Penetrómetro de Dinámico de Cono (Thenoux Z. & Gaete P., 1995, p. 6).

### 2.2.5. Método de las diferencias acumuladas

Con el propósito de establecer sectores de comportamiento homogéneo para el análisis de resultados, se ha realizado una sectorización del tramo en fracciones homogéneas, considerando como criterios de sectorización las diferencias acumuladas ( $Z_x$ ) de la deflexión máxima normalizada ( $D_0$ ). Esta metodología se denomina de las Diferencias Acumuladas. (AASHTO, 1993)

Al respecto (Bravo Castro, 2009, p. 109), precisa que se basa en los siguientes procedimientos:

- Se realiza una hoja de cálculo EXCEL, la primera columna denota la abscisa de la prueba que corresponda.

$$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 \dots X_n$$

Donde:

- $X_1$  : La abscisa en el punto 1.
- $X_n$  : La Abscisa en el enésimo punto.
- La segunda columna denominada Distancia de Intervalo presentará la diferencia entre las Abscisas de la columna 1, expresada en metros.

$$\Delta X_1 = 0$$

$$\Delta X_1 = X_1 - X_0$$

$$\Delta X_2 = X_2 - X_1$$



$$\Delta X_n = X_n - X_{n-1}$$

- La tercera columna denominada espacio o Distancia Acumulativa es el cálculo del acumulado de las distancias de la columna número 2.

$$\begin{aligned}\sum \Delta X_1 &= 0 \\ \sum \Delta X_2 &= \Delta X_1 + \Delta X_2 \\ \sum \Delta X_3 &= \Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3 \\ \sum \Delta X_n &= \Delta X_1 + \Delta X_2 + \dots + \Delta X_{n-1} + \Delta X_n\end{aligned}$$

- La cuarta columna muestra la respuesta (r) del pavimento en nuestro caso la deflexión máxima de los 9 fwd (D1).
- La quinta columna manifiesta el promedio entre las deflexiones.

$$\begin{aligned}\bar{r}_1 &= r_1 \\ \bar{r}_2 &= \frac{r_1 + r_2}{2} \\ \bar{r}_n &= \frac{r_{n-1} + r_n}{2}\end{aligned}$$

- La columna seis denominada el Área de Intervalo se precisa con la ayuda de la expresión siguiente:

$$\begin{aligned}a_1 &= 0 \\ a_2 &= \Delta X_2 x \bar{r}_2 \\ a_n &= \Delta X_n x \bar{r}_n\end{aligned}$$

- La columna siete denominada el Área Acumulativa se precisa por medio de la expresión siguiente:

$$\begin{aligned}\sum a_1 &= 0 \\ \sum a_2 &= a_1 + a_2 \\ \sum a_3 &= a_1 + a_2 + a_3 \\ \sum a_n &= a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_{n-1} + a_n\end{aligned}$$

- Se determina el factor de diferencia con la siguiente fórmula:

$$F = \frac{\text{Área Acumulativa}}{\text{Distancia Acumulativa}}$$
$$F = \frac{\sum a_n}{\sum \Delta X_n}$$

- La columna ocho determina la Diferencia Acumulada por medio de la siguiente expresión:

$$ZX_1 = 0$$
$$ZX_2 = \sum a_2 - (F \times \sum \Delta X_2)$$
$$ZX_n = \sum a_n - (F \times \sum \Delta X_n)$$

- Se realiza un gráfico  $Zx$  Vs Abscisa, el cual nos facilitará ver las partes homogéneas. Teóricamente, se determinará una nueva sección cada vez que varíe la pendiente del gráfico. Se tendrá en cuenta que el tratamiento de rehabilitación en secciones pequeñas no es rentable considerándolos caros (Bravo Castro, 2009, p. 111).

## 2.2.6. Caracterización física – mecánica

### 2.2.6.1. Caracterización física del material

Se define a las propiedades físicas a la interacción del material, con el material orgánico y su relación con el medio. Al conocer sus características físicas de un suelo, permite comprender los distintos usos a lo que se destina (Molina Vinasco & Alzate Buitrago, 2018, p. 22).

A continuación, se menciona las propiedades físicas del material.

#### A) Contenido de humedad (MTC E 108)

Según el (MTC, 2016), sostiene que es la proporción entre el peso del agua de una masa de suelo y el peso de las partículas sólidas expresada en porcentaje, llamamos así al contenido de humedad del suelo. Así mismo, (Huaquisto Cáceres, 2015, p. 17), define que el contenido de humedad de una masa de suelo es el porcentaje de agua de un suelo en términos de su peso seco.

Se determina el contenido de humedad, con ayuda de la siguiente ecuación:

$$W = \frac{M_W}{M_S} \times 100$$

Donde:

- $W$  : Contenido de humedad, (%)
- $W_S$  : Peso de los sólidos del suelo.

### **B) Análisis granulométrico de suelos por tamizado (MTC E 107)**

Consiste en calcular cuantitativamente la distribución granulométrica de los suelos (Huaquisto Cáceres, 2015, p. 37).

Muy aparte según el (MTC, 2016), señala que determina las proporciones de suelos que pasan por los distintos tamices de la serie empleada.

Tamices de malla cuadrada. Incluyen las siguientes aberturas:

**Tabla 1:** *Serie de tamices*

<b>TAMICES</b>	<b>ABERTURA (mm)</b>
3"	75,000
2"	50,800
1 ½"	38,100
1"	25,400
¾"	19,000
⅜"	9,500
Nº 4	4,760
Nº 10	2,000
Nº 20	0,840
Nº 40	0,425
Nº 60	0,260
Nº 140	0,106
Nº 200	0,075

*Fuente:* (MTC, 2016)

Porción de muestra que depende del tamaño máximo de las partículas.

**Tabla 2:** *Peso mínimo aproximado*

<b>Diámetro Nominal de las Partículas más Grandes mm (pulg)</b>	<b>Peso Mínimo Aproximado de la Porción (g)</b>
9,5 (3/8")	500
19,6 (3/4")	1000
25,7 (1")	2000
37,5 (1 1/2")	3000
50,0 (2")	4000
75,0 (3")	5000

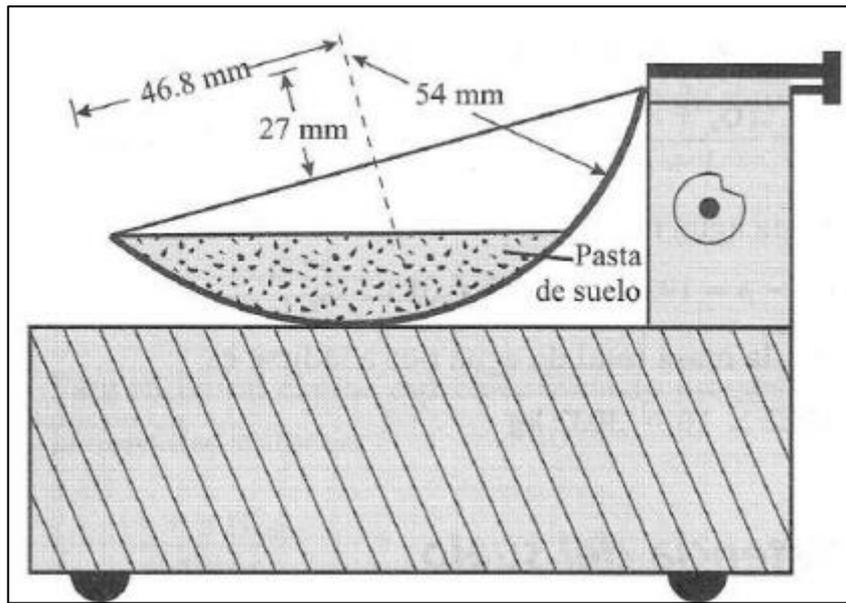
*Fuente:* (MTC, 2016)

### **C) Límite líquido (MTC E 110)**

El (MTC, 2016), menciona que la prueba determina el contenido de humedad, para ello el suelo debe encontrarse en el límite entre los estados líquido y plástico. Se designa como contenido de humedad al cual el surco separador de dos mitades de una masa de suelo que se junta a lo largo de su fondo sobre una distancia de 13 mm (1/2 pulg), para ello, la copa de Casagrande debe dejarse caer 25 veces desde una altura de 1 cm a razón de 02 caídas por segundo.

La prueba se realiza con el equipo de la siguiente figura:

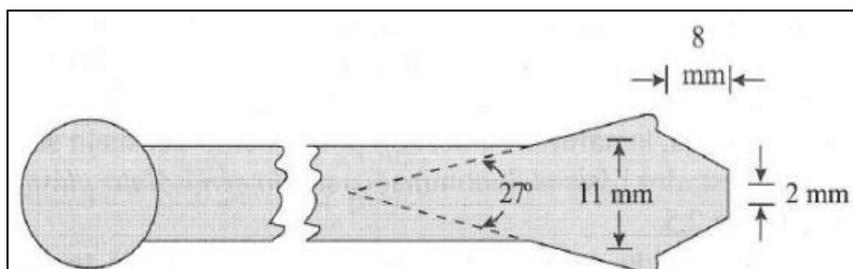
**Figura 6**  
*Vista lateral del equipo*



*Fuente:* (M. Das, 2001, p. 66)

De la figura mostrada calibrar la copa de bronce elevándose a 10mm para efectuar la prueba, luego se instala sobre la base de hule duro, en la copa de bronce se coloca una masa de suelo, se deja enrasado y cortado por un ranurador por el medio.

**Figura 7**  
*Medidas del ranurador*

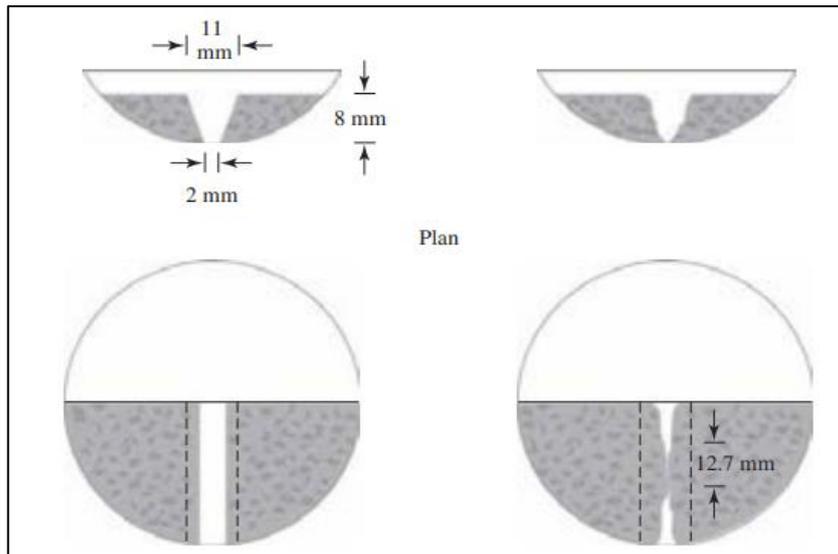


*Fuente:* (M. Das, 2001, p. 66)

Luego la copa de bronce se deja soltar a una altura de 1cm, a razón de 2 golpes por segundo la masa de suelo, hasta que se haya las dos masas de suelo divididos en 12.7 mm aproximadamente, tener en cuenta que al menos realizar 4 pruebas con un contenido de humedad variable con la finalidad de calcular el número de golpes N, que necesariamente varía entre 15 y 35 golpes, para conseguir el cierre.

### Figura 8

Porción de muestra antes y después de la prueba



Fuente: (M. Das, 2001, p. 66)

Considerar también que, el suelo debe ser reportado como no plástico NP sin realizar el ensayo de Límite Plástico (LP) si continúa deslizándose sobre la copa de bronce a un número de golpes menores a 25, no es aplicable este ensayo y se indica que no se puede determinar el límite líquido (Huaquisto Cáceres, 2015, p. 65).

Para determinar el Límite líquido por un punto se determina mediante la siguiente ecuación:

$$LL = W^n \left( \frac{N}{125} \right)^{0.121}$$

Donde:

- $N$  : números de golpes requeridos para cerrar la ranura para el contenido de humedad
- $W_n$  : Contenido de humedad del suelo.

#### D) Límite plástico (L.P.) e índice de plasticidad (I.P.) (MTC E 110)

Es el contenido de humedad más bajo en el que el suelo deja de deformarse y pasa de un estado plástico hacia un estado semisólido (Zapata Coacalla, 2016, p. 21).



Por otro lado, según el (MTC, 2016), menciona que este ensayo se emplea para caracterizar las fracciones de grano, clasificación AASHTO y SUCS, por ende, se define que al límite plástico (L.P.) es el contenido de humedad más bajo al que se pueden formar barras de suelo aproximadamente de unos 3,2 mm (1/8") de diámetro, haciendo rodar dicho material entre la palma de la mano y una superficie lisa (vidrio esmerilado), sin que dichas barritas se desintegren.

Según el (MTC, 2016), Es práctica común asociar parámetros del suelo como el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad con comportamientos de ingeniería como la compresibilidad, la permeabilidad, la compactibilidad, la contracción-expansión y la resistencia al corte.

El límite plástico es el resultado del promedio de las humedades expresado en porcentaje de humedad, calculándose de la siguiente forma:

$$\text{Límite Plástico} = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo secado al horno}} \times 100$$

Cálculo del Índice de Plasticidad:

$$I.P = L.L. - L.P.$$

Donde:

- *L.L.* : Límite Líquido
- *L.P.* : Límite Plástico
- *L.L.* y *L.P.* , Son números enteros

El (MTC, 2016), aclara que:

Cuando el límite líquido o el límite plástico no puedan obtenerse, el índice de plasticidad se menciona con la abreviatura NP (no plástico).

Por otro lado, cuando el límite plástico resulte igual o mayor que el límite líquido, el índice de plasticidad se menciona como NP (no plástico).

### Sistema de clasificación AASHTO:

En 1929 se creó este sistema, que forma parte del sistema de clasificación de la Administración de Carreteras. Actualmente se utiliza la versión recomendada por el Comité de Clasificación de Materiales para Subrasantes y Granulares, esto del Consejo de Investigación de Carreteras en 1945, después de pasar por múltiples cambios (Norma ASTM D-3282; método AASHTO M145).

El método AASHTO clasifica en siete grupos fundamentales: Los suelos del grupo A-1; A-2 y A-3 son componentes granulares y los suelos del grupo A-4; A-5; A-6 y A-7 son materiales entre limos y arcillas. (M. Das, 2001, p. 78)

**Tabla 3:** Clasificación de materiales de carreteras subrasantes, 35% o menos pasante N°200

Clasificación General	Componentes granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)							
	A-1			A-2				
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)								
Núm. 10	50 máx.							
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.					
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx	35 máx.	35 máx	35 máx	
Características de la fracción que pasa N° 40								
Límite líquido				40 máx	41 mín.	40 máx	41 mín	
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx	10 máx.	11 mín.	11 mín	
Tipos comunes de componentes significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena				
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno							

Fuente: (M. Das, 2001, p. 79)

**Tabla 4:** Clasificación de materiales de carreteras subrasantes, más del 35% pasante N°200

Clasificación General	Componentes granulares (más del 35% del total de la muestra pasada por el núm. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6**
Grupo de clasificación				
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10				
Núm. 40				
Núm. 200	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características de la fracción que pasa N° 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	10 mín.	11 mín.
Tipos comunes de componentes significativos constituyentes	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo			

\*Para A-7-5,  $PI \leq LL - 30$

\*\*Para A-7-6,  $PI > LL - 30$

Fuente: (M. Das, 2001, p. 79)

Para la clasificación mediante el método AASHTO se debe tener en cuenta los criterios siguientes. (M. Das, 2001, p. 80)

- **Tamaño de grano**

**Grava:** Material que pasa la malla de 3" (75 mm) y es retenida en la malla No. 10 (2 mm).



**Arena:** Material que pasa la malla No. 10 (2 mm) y es retenida en la malla No. 200 (0.075 mm).

**Limo y Arcilla:** Material que pasa la malla No. 200.

- **Plasticidad**

**Limoso:** El tamaño de las partículas tienden a tener un índice de plasticidad de 10 o menos.

**Arcilloso:** El tamaño de las partículas tienden a tener un índice de plasticidad de 11 o más.

- **Índice de grupo**

El índice de grupo (IG) se asigna a subgrupos y grupos de materiales para evaluar la cualidad de un suelo como material de subrasante de carreteras. Este número se escribe entre paréntesis después de la designación del grupo o subgrupo La fórmula de este número, es la siguiente (M. Das, 2001, p. 81).

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

Donde:

- *F* : Porcentaje pasado por el tamiz N°200.
- *LL* : Límite líquido.
- *PI* : Índice de plasticidad.

Si la fórmula presentada IG, es negativa se toma el valor igual a 0. Por otro lado, el resultado del IG se redondea al entero más próximo. Para clasificar por este método los valores se consideran de izquierda a derecha, y cabe precisar que el IG se valora en un paréntesis. (M. Das, 2001, p. 81)

**Sistema unificado de clasificación de suelos:**

Este procedimiento fue propuesto por Casagrande que introdujo este método en 1948 para el uso de la mano de obra en la construcción de aeropuertos. Este método se



actualizó en 1952 en colaboración con el Bureau of Reclamation de Estados Unidos, clasificando los suelos en dos grupos principales (M. Das, 2001, p. 82).

1. Suelos con menos del 50% de grano grueso que contienen grava y arena en su forma nativa y que atraviesan el tamiz N.º 200. Los símbolos de grupo llevan un prefijo G o S al principio. S significa arena, y G significa grava.
2. Suelos con granos finos que atraviesan el tamiz N.º 200 en al menos un 50%. M, que significa limo inorgánico, C, que significa arcilla inorgánica, y O, que significa limos y arcillas orgánicos. Para la turba y otros suelos altamente orgánicos, se usa la abreviatura Pt.

Símbolos usados para la clasificación por el sistema SUCS.

W: Bien graduado.

P: Mal graduado.

L: Baja plasticidad (límite líquido menor que 50).

H: Alta Plasticidad (límite líquido mayor que 50).

Para clasificar mediante este método se debe conocer lo siguiente:

1. Porcentaje de grava, porción que pasa el tamiz de 76.2 mm y retenida en el tamiz núm. 4 (4.75 mm).
2. El porcentaje de arena, porción que pasa el tamiz N.º 4 (4.75 mm) y es retenida en el tamiz N.º 200.
3. El porcentaje de limo y arcilla, fragmento que atraviesa el tamiz N.º 200.
4. El coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y el coeficiente de curvatura ( $C_c$ ).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$
$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

Donde:

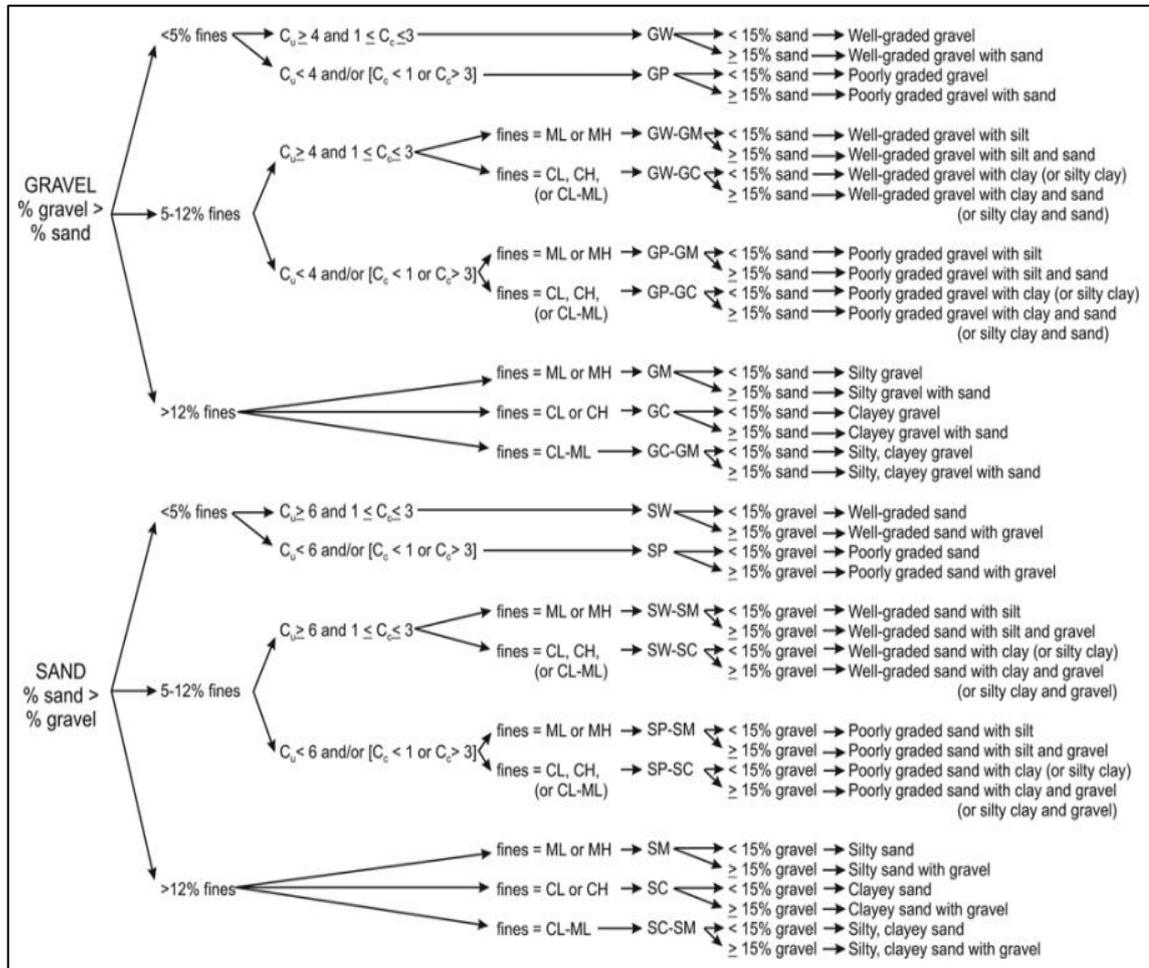
- $C_u$  : Coeficiente de uniformidad.
- $C_c$  : Coeficiente de curvatura.
- $D_{10}$  : Diámetro al 10% de finos de la curva granulométrica.

- $D_{30}$  : Diámetro al 30% de finos de la curva granulométrica.
- $D_{60}$  : Diámetro al 60% de finos de la curva granulométrica.

5. El límite líquido y el índice de plasticidad del fragmento de suelo que atraviesa el tamiz N° 40 (M. Das, 2001, p. 84).

**Figura 9**

Diagrama de flujo para la clasificación de suelos de grano grueso (más del 50 % retenido en el tamiz n° 200)

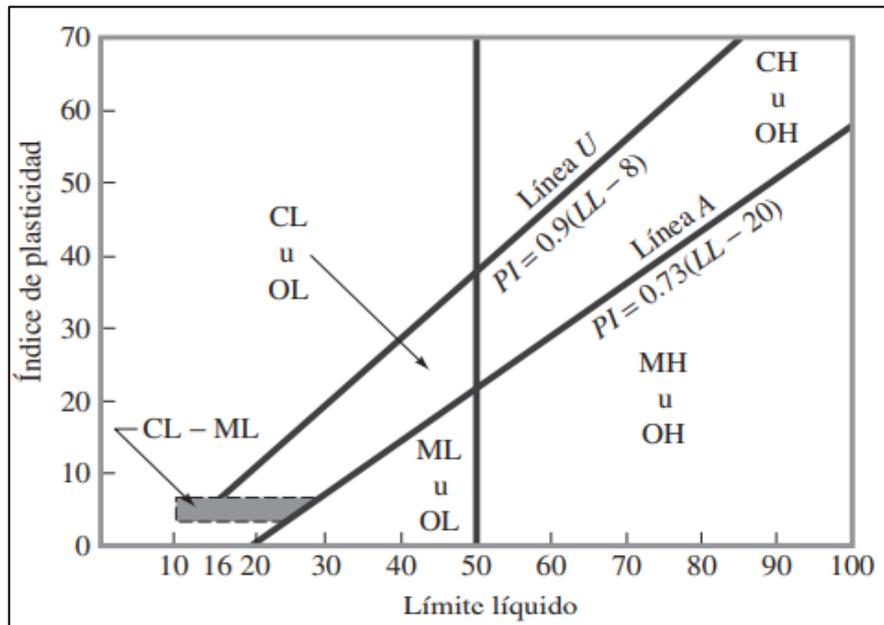


Fuente: (ASTM D2487, 2017, p. 5)

**Carta de plasticidad:**

En una extensa gama de suelos naturales, Casagrande (1932) investigó cómo se relacionaba el índice de plasticidad con el límite líquido. Sugirió una carta de plasticidad de acuerdo a los resultados de las pruebas (M. Das, 2001, p. 73).

**Figura 10**  
*Carta de plasticidad*



Fuente: (M. Das, 2001, p. 74)

### 2.2.6.2. Caracterización mecánica del material

Estas características o propiedades son las que el ingeniero emplea directamente para el diseño, ya sea carretera, cimentación y por lo tanto las únicas que finalmente interesan.

#### A) Densidad de campo – Cono de arena (MTC E 117)

Según el (MTC, 2016), el método de cono de arena puede ser utilizado para determinar la densidad in situ de depósitos de suelos naturales, mezclas de suelos, agregados, u otro material. Con este método se determinan la densidad de materiales compactados encontrados en el sitio.

El cálculo del volumen del orificio se realiza de la siguiente manera:

$$V = \frac{M_1 - M_2}{\rho_1}$$

Donde:

- $V$  : Volumen del orificio de prueba, cm<sup>3</sup>.



- $M_1$  : Masa de la arena aplicada para llenar el orificio de prueba, embudo y plato de base, g.
- $M_2$  : Masa de la arena aplicada para llenar el embudo y el plato de base, g.
- $\rho_1$  : Densidad del volumen de la arena, g/cm<sup>3</sup>.

El cálculo de la masa seca del material extraído del orificio se realiza tal como sigue:

$$M_4 = \frac{100xM_3}{(W + 100)}$$

Donde:

- $W$  : Contenido de humedad del material extraído del orificio de prueba, %.
- $M_3$  : Masa húmeda del material del hueco de ensayo, g.
- $M_4$  : Masa seca del material del hueco de ensayo, g.

El cálculo de la densidad húmeda y seca in – situ del material, se define tal como se muestra a continuación:

$$\rho_m = \frac{M_3}{V}$$
$$\rho_d = \frac{M_4}{V}$$

Donde:

- $V$  : Volumen del orificio de prueba, cm<sup>3</sup>.
- $M_3$  : Masa húmeda del suelo del orificio de prueba, g.
- $M_4$  : Masa seca del suelo del orificio de prueba, g.
- $\rho_m$  : Densidad húmeda del material probado, o su peso unitario húmedo  $\gamma_m$ , en g/cm<sup>3</sup>
- $\rho_d$  : Densidad seca del material probado, o su peso unitario seco  $\gamma_d$ , en g/cm<sup>3</sup>.

## **B) Corrección del peso unitario en suelos que contienen partículas sobredimensionadas (ASTM D 4718)**

Esta práctica presenta el procedimiento para calcular el peso unitario y contenido de agua de suelos que tienen gran tamaño de partículas cuando los datos son conocidos para la fracción de suelo con los sobre tamaños removidos. La corrección del peso unitario



y contenido de agua es aplicable para suelos que tienen más del 5% en peso de tamaño mayor al utilizado en la prueba ó hasta el 40% retenido acumulado en el tamiz N°4 y hasta el 30% retenido acumulado en el tamiz ¾" según corresponda. (ASTM D4718, 2015, p. 1)

Para la corrección de densidad para una fracción de una muestra de suelo, la norma indica la siguiente formulación matemática:

$$\gamma_F = \gamma_D G_m \gamma_w P_F / (100 G_m \gamma_w - \gamma_D P_C)$$

Donde:

- $\gamma_F$ : Densidad sin incluir las partículas con sobretamaño
- $\gamma_D$ : Densidad incluyendo las partículas de sobretamaño
- $G_m$ : Peso específico de las partículas de sobretamaño
- $\gamma_w$ : Peso unitario del agua
- $P_C$ : Porción de partículas más gruesas que el tamaño máximo considerado
- $P_F$ : Porción de partículas más finas que el tamaño máximo considerado

### C) Compactación de suelos – Proctor modificado (MTC E 115)

El (MTC, 2016), sostiene que el ensayo establece la relación entre el Contenido de Agua y Peso Unitario Seco de los suelos compactados en un molde de 101,6 ó 152,4 mm de diámetro con un pisón de 44,5 N que cae de una altura de 457 mm, el cual produce una energía de Compactación de (2700 kN-m/m<sup>3</sup>).

Asimismo, sólo pueden someterse a esta prueba los suelos con un 30% o menos en peso de sus partículas retenidas en el tamiz de ¾". Se ofrecen tres enfoques diferentes. Las especificaciones del material a ensayar deben especificar el procedimiento a emplear. La decisión se tomará basándose en la gradación del material si el procedimiento no se indica.

(Huaquisto Cáceres, 2015, p. 73), menciona como uno de sus objetivos, determinar la compactación de un suelo en laboratorio y conseguir la proporción densidad-humedad para un esfuerzo de compresión específico.

**Tabla 5:** *Método proctor modificado*

CONCEPTO	MÉTODO A	MÉTODO B	MÉTODO C
Diámetro del Molde (mm)	101.6	101.6	152.4
Volumen del Molde (cm <sup>3</sup> )	943.3	943.3	2124
Peso del Pisón (N)	44.5	44.5	44.5
Altura de Caída del Pisón (mm)	457.2	457.2	457.2
Número de Golpes del Pisón por Capa de Suelo	25	25	56
Número de capas de Compactación	5	5	5
Energía de Capas de Compactación $\frac{Kn}{m/m^3}$	2696	2696	2696
Cantidad de suelo kg	3	3	6
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla N° 4 (4.75mm). Si 20% o menos por peso de material es retenido en la malla N°4	Porción que pasa la malla 3/8" (9.5mm). Si es retenido en la malla N°4 en más del 20% y 20% o menos es retenido en la malla 3/8".	Porción que pasa la malla 3/4" (19.0mm). Si más del 20% es retenido en la malla 3/8" y menos del 30% es retenido en la malla 3/4".

*Fuente:* (Huaquisto Cáceres, 2015, p. 75)

El cálculo de la densidad húmeda y densidad seca, se determina de la siguiente manera:

$$\sigma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

Donde:

- $\sigma_m$  : Densidad del Suelo Húmedo.
- $W_m$  : Peso del Suelo Húmedo Compactado.

- $V_m$  : Volumen del Molde.

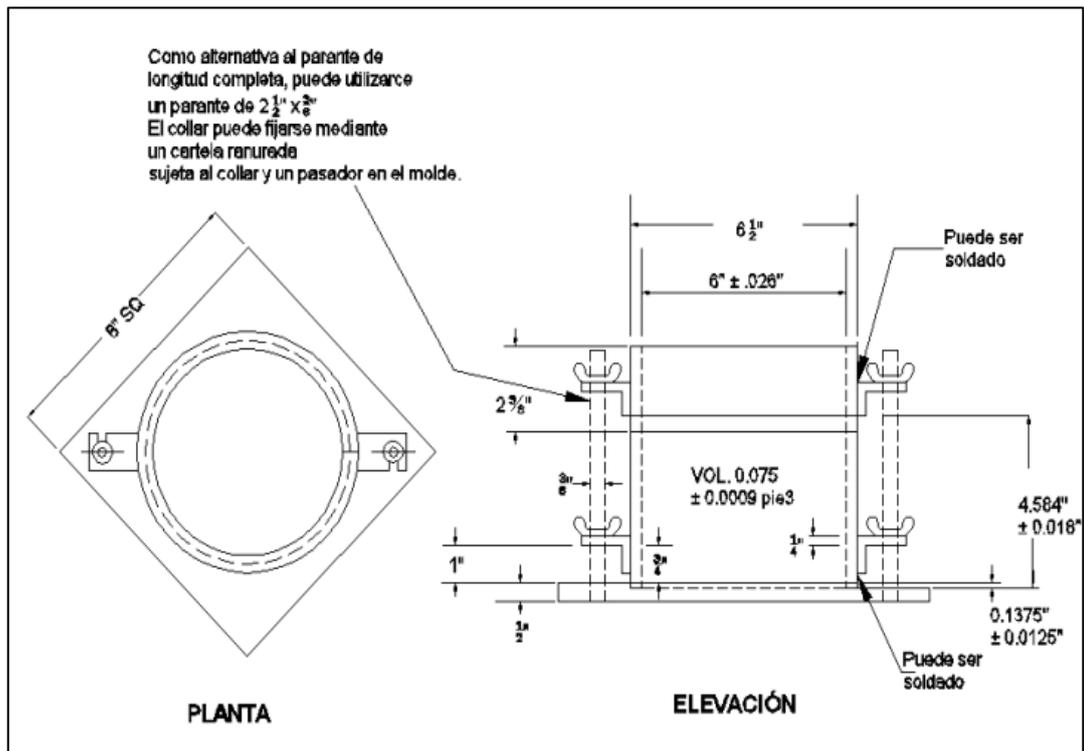
$$\sigma_d = \frac{\sigma_m}{1 + \frac{W}{100}}$$

Donde:

- $\sigma_d$  : Densidad Seca de la muestra Compactado.
- $W$  : Porcentaje del Contenido de Agua.

**Figura 11**

*Molde cilíndrico para el método C*



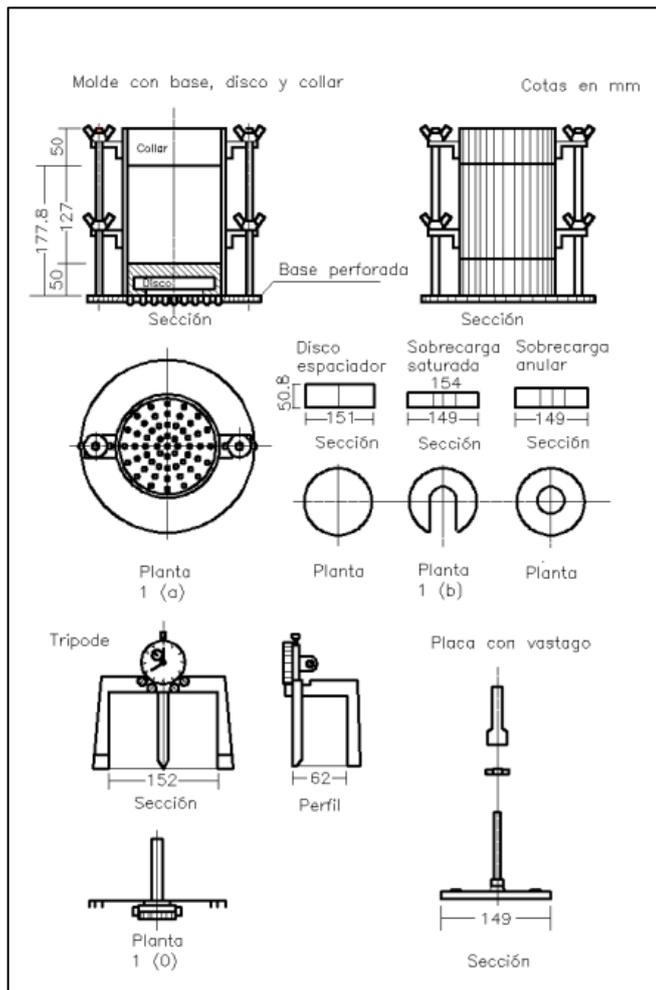
Fuente: (MTC, 2016, p. 113)

#### D) CBR (Relación de Soporte de California) de suelo - laboratorio

Según el (MTC, 2016), el valor del coeficiente portante, o CBR, es una medida de la resistencia de un suelo y es el objetivo del ensayo. La prueba se realiza en un entorno húmedo y denso.

Este indicador se utiliza para evaluar la capacidad de resistencia o portante de la base, la subbase, afirmado, así como los suelos de la subrasante (Huaquisto Cáceres, 2015, p. 83).

**Figura 12**  
*Molde CBR, trípode y dial*



Fuente: (MTC, 2016, p. 231)

El CBR se obtiene como la proporción entre la fuerza unitaria (MPa) necesaria para que el pistón, cuya área aproximada es de 19,35cm<sup>2</sup>, penetre una cierta profundidad en la muestra compactada (Huaquisto Cáceres, 2015).

$$CBR = \frac{Carga\ unitaria\ del\ ensayo}{Carga\ unitaria\ patrón} \times 100$$

Donde:

- Carga unitaria patrón (1<sup>ra</sup>); Referido a la Penetración 2.54mm con carga estándar 70.31 kg/cm<sup>2</sup>.
- Carga unitaria patrón (2<sup>da</sup>); Referido a la Penetración 5.08mm con carga estándar 105 kg/cm<sup>2</sup>.

Se presenta la clasificación cualitativa del suelo:

**Tabla 6:** *Clasificación cualitativa del suelo*

<b>C.B.R.</b>	<b>Clasificación cualitativa del suelo</b>	<b>Uso</b>
2 – 5	Muy mala	Sub-rasante
5 – 8	Mala	Sub-rasante
8 – 20	Regular a buena	Sub-rasante
20 – 30	Excelente	Sub-rasante
30 – 60	Buena	Sub-base
60 – 80	Buena	Base
80 – 100	Excelente	Base

*Fuente:* (Zapata Coacalla, 2016, p. 32)

Para la determinación de la humedad de compactación, se calcula el porcentaje de agua que hay que añadir al suelo que ya contiene una humedad natural, y de esa manera alcance la humedad que se necesita, la formula aplicada se presenta a continuación:

$$\% \text{ de agua a añadir} = \frac{H - h}{100 + h}$$

Donde:

- $H$  : Humedad Prefijada.
- $h$  : Humedad Natural.

Por otro lado, la expansión se calcula por la diferencia de lecturas del deformímetro del antes y después de la inmersión.

$$\% \text{ Expansión} = \frac{L2 - L1}{127} \times 100$$

Donde:

- $L1$  : Lectura inicial en mm.
- $L2$  : Lectura final en mm.
- 127 mm: Altura de la muestra en el molde (5”).

## **2.2.7. Deflectometría**

### **2.2.7.1. Generalidades**

Los deflectómetros, como la conocida "Viga Benkelman" (que debe su nombre a Alvin Carlton Benkelman, quien la inventó en 1953 como parte del programa de ensayos

en carretera WASHO), pueden utilizarse para medir las deflexiones provocadas en la superficie de un pavimento flexible por la acción de las cargas de los automóviles. Debido a la objetividad de los datos que produce en los análisis estructurales de los pavimentos flexibles, su aplicación se ha extendido ampliamente desde entonces (Hoffman & del Águila, 1985, p. 14).

#### **2.2.7.2. *Viga Benkelman***

(Hoffman & del Águila, 1985, p. 14), hace referencia que:

La defleómetro de Viga Benkelman opera según el principio de la palanca. Es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple, se compone de dos partes: (1) un cuerpo portante que se coloca directamente sobre el suelo mediante tres soportes (dos soportes delanteros fijos "A" y un soporte trasero ajustable "B"), y (2) un brazo móvil que se conecta al cuerpo fijo mediante una junta pivotante "C", uno de cuyos extremos está en contacto sensible con el vástago de un extensómetro que se desplaza verticalmente (punto "E") y cuyo otro extremo descansa sobre el suelo "D".

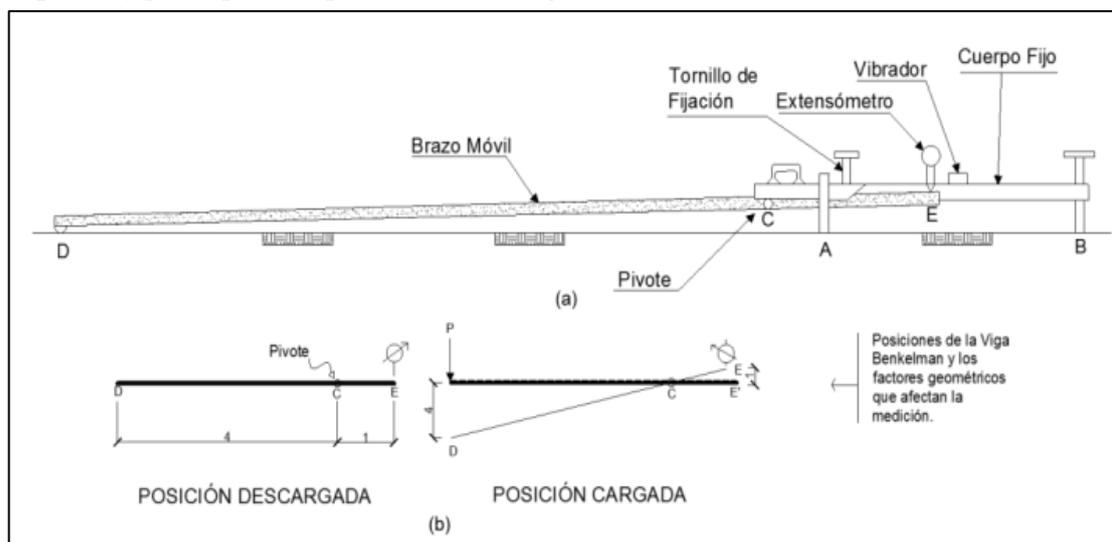
Además, el aparato contiene un vibrador incorporado que, cuando se activa a lo largo de las pruebas, impide que la indicación de la esfera se bloquee o se vea afectada por cualquier interferencia exterior.

El extremo "D" o "punta de viga" es de un grosor tal que puede colocarse entre uno de los neumáticos dobles del eje trasero de un camión cargado. Por el peso aplicado se produce una deformación del pavimento, como resultado de la cual la punta desciende una determinada altura. Como resultado de esta acción, el brazo "DE" gira alrededor del punto fijo "C", con respecto al cuerpo "AB", haciendo que el extremo "E" produzca un movimiento vertical en el vástago del extensómetro apoyado en él, generando así una lectura en el dial.

Si a continuación se retiran los neumáticos cargados, se recupera el punto "D" en lo que a deformación elástica se refiere y por el mismo mecanismo anterior, se genera otra lectura en el cuadrante del extensómetro. La operación anterior representa el " método de medición " con la Viga Benkelman. Lo que se hace después son sólo cálculos a partir de los datos recogidos. Así, con las dos lecturas obtenidas es posible determinar cuánto se flexionó el pavimento en el lugar subyacente al punto "D" de la viga durante el procedimiento descrito. Debe tenerse en cuenta que lo que realmente se mide es la recuperación del punto "D" cuando se retira la carga (rebote elástico) y no la deflexión cuando se coloca la carga. Para calcular la deformación hay que tener en cuenta la geometría de la viga, ya que los valores dados por el extensómetro (EE') no están a una escala real, sino que dependen de la relación de brazos que exista.

### Figura 13

*Esquema y principio de operación de la viga benkelman*



Fuente: (Hoffman & del Águila, 1985, p. 15)

#### A) Equipo requerido:

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

- 01 Viga Benkelman.
- 01 extensómetro con el dial indicador de particiones cada 1/100 mm.



- 01 camión cargado, con eje trasero que tenga un peso de 18,000 lb. (8.2 tn) distribuidas en un par de neumáticos dobles inflados a una presión de 75 a 85 psi.
- 01 vehículo para transportar al equipo y al personal.
- Señales de seguridad, termómetro, cinta métrica de 5 m, hojas de campo, lápices, martillo, plumones punta gruesa, plomada, varilla de metal o madera de 2m, balanza portátil para pesaje del camión, con capacidad de 10 toneladas.

#### **B) Disposiciones en campo**

- Se trazará una línea transversal a la calzada en el punto del pavimento en el que se vaya a realizar la prueba. El punto de ensayo debe situarse a lo largo de esta línea a cierta distancia del borde. Se sugiere usar las distancias que figuran en la tabla siguiente.

**Tabla 7:** *Distancias Prefijada Desde el Borde*

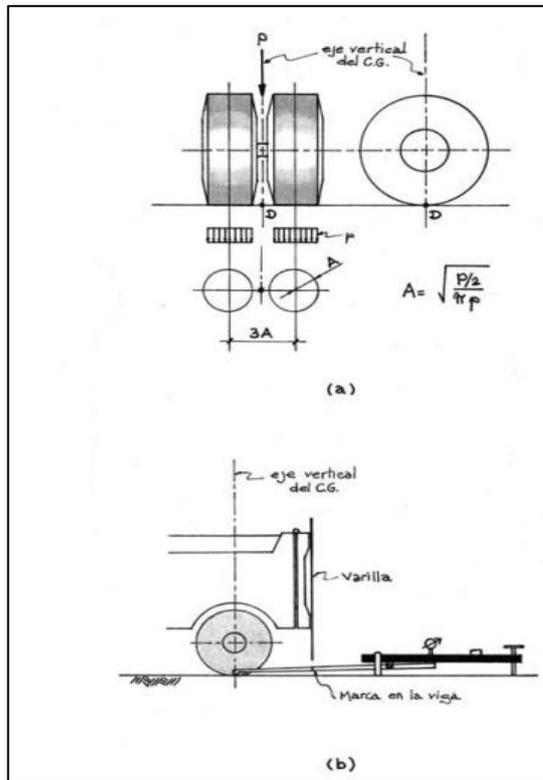
<b>ANCHO DE CARRIL</b>	<b>Distancia del Punto de Ensayo Desde el Borde del Pavimento</b>
2.70m	0,45 m
3.00m	0,60 m
3.30m	0,75 m
3.60m a más	0.90 m

*Fuente:* (MTC, 2016, p. 847)

- El rango de temperatura deberá establecerse entre 5°C y 35°.
- Considerar la siguiente configuración como referencia durante el procedimiento a ejecutar en campo, lo cual se detalla en el capítulo de materiales y métodos.

### Figura 14

Configuración geométrica del sistema de carga en ensayos con la viga benkelman

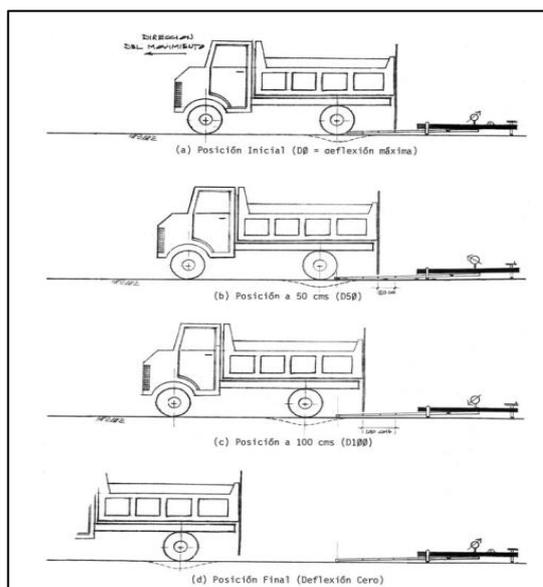


Fuente: (Hoffman & del Águila, 1985, p. 17)

- Tener en cuenta que por lo menos realizar 3 mediciones por punto, para tener una mejor objetividad en los resultados.

### Figura 15

Esquematización del proceso de medición con la viga benkelman



Fuente: (Hoffman & del Águila, 1985, p. 18)

### C) Cálculo de deflexiones

Para el cálculo, se debe calcular la diferencia entre la lectura inicial y la lectura final y multiplicarlo por la relación de brazo de la Viga Benkelman.

$$D = (LF - LR) \times RB$$

Donde:

- $D$  : Deflexión a la Distancia R, Expresada en 0.01 mm.
- $LR$  : Lectura a la distancia R.
- $LF$  : Lectura máxima.
- $RB$  : Relación de Brazos de la Viga Benkelman (normalmente es 1:2 ó 1:4).

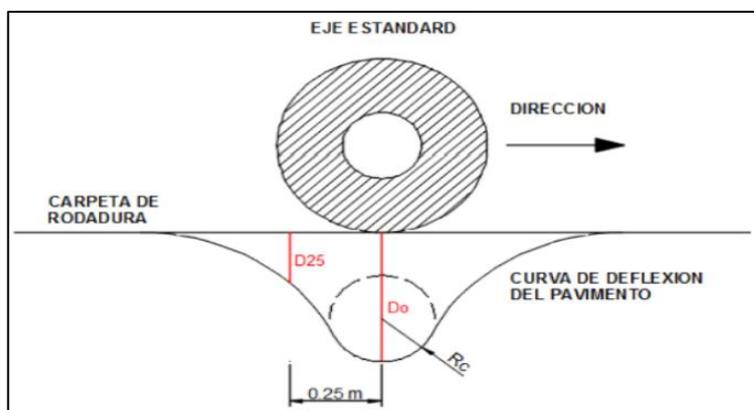
### D) Cálculo de radio de curvatura

El grado de deformación por tracción lineal que experimentan las capas elásticas cuando se flexionan bajo cargas de tránsito está determinado por el grado de curvatura de la línea elástica de deflexión, que es una propiedad de importancia fundamental (Cubas de la Torre, 2017, p. 44).

El procedimiento para calcular el radio de curvatura se basa en la hipótesis de que, hasta una distancia superior a 25 cm, la línea de deflexiones de la distancia al eje de la carga se aproxima a una parábola, sufriendo a continuación una inflexión para asistir asintóticamente horizontal. Consideremos la hipótesis de la figura siguiente (Cubas de la Torre, 2017, p. 44).

#### Figura 16

*Deformada del pavimento y radio de curvatura*



Fuente: (Cubas de la Torre, 2017, p. 45)

Según el (MTC, 2016) el radio de curvatura se calcula con la siguiente expresión:

$$RC = \frac{3125}{(D_0 - D_{25})}$$

Donde:

- $RC$  : Radio de Curvatura (m).
- $D_0$  : Deflexión que se recupera en el eje vertical de carga.
- $D_{25}$  : Deflexión que se recupera a 25 centímetros del eje vertical.

### E) Deflexión característica

Según el (MTC, 2014), menciona que: “La deflexión característica es el valor de deflexión que mejor representa a un determinado sector homogéneo”. La determinación de la deflexión se realiza de acuerdo al siguiente cuadro:

**Tabla 8:** Deflexiones características según tipo de carretera

TIPO DE CARRETERA	DEFLEXIÓN	
	CARACTERÍSTICA	OBSERVACIÓN
	$D_c$	
“Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles”	$D_c = D_m + 1.645 * \sigma$	Deflexión característica, para una confiabilidad de 95%
“Carreteras cuales o multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles”	$D_c = D_m + 1.645 * \sigma$	Deflexión característica, para una confiabilidad de 95%”
“Carreteras de primera clase: carreteras con un IMDA entre 4000- 2001 veh/día, de una calzada de dos carriles”	$D_c = D_m + 1.645 * \sigma$	Deflexión característica, para una confiabilidad de 95%”
“Carreteras de segunda clase: carreteras con un IMDA entre 2000- 401 veh/día, de una calzada de dos carriles”	$D_c = D_m + 1.282 * \sigma$	Deflexión característica, para una confiabilidad de 90%”

“Carreteras de tercera clase: carreteras con un IMDA entre 400- 201 veh/día, de una calzada de dos carriles”	$Dc = Dm + 1.282 * \sigma$	“Deflexión característica, para una confiabilidad de 90%”
“Carreteras de bajo volumen de tránsito: carreteras con un IMDA $\leq$ 200 veh/día, de una calzada”	$Dc = Dm + 1.036 * \sigma$	“Deflexión característica, para una confiabilidad de 85%”

---

Nota: DC= Deflexión característica, Dm=Deflexión media,  $\sigma$ =Desviación estándar”

---

Fuente: (MTC, 2014, p. 172)

### • Cálculo de la Deflexión Promedio o Deflexión Media

El cálculo de la deflexión promedio, se determina de la siguiente manera:

$$Dm = \sum_{i=1}^n Di$$

Donde:

- $Dm$ : Deflexión media de  $n$  deflexiones.
- $Di$ : Deflexiones desde  $i=1$  a  $i=n$
- $n$ : Número total de medidas.

### • Cálculo de la Desviación Estándar

El cálculo de la desviación estándar, se determina de la siguiente manera:

$$\text{Para "n"} \leq 30 \text{ entonces } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Di - Dm)^2}{n-1}}$$

Donde:

- $\sigma$ : Desviación estándar.
- $Di$ : Deflexiones desde  $i=1$  a  $i=n$ .
- $n$ : Número total de medidas.
- $Dm$ : Deflexión media de  $n$  deflexiones.

### • Cálculo del Coeficiente de Variación

$$C.V. = \frac{\sigma}{Dm} * 100$$

Donde:

- $\sigma$ : Desviación estándar.



- *D<sub>m</sub>*: Deflexión media.

### 2.2.8. Modelo de Hoog

(Del Aguila Rodriguez, 2007), refiere que el modelo de Hoog es una técnica para determinar el módulo elástico del suelo de subrasante exactamente por debajo de una carga superficial aplicada. Este método se basa en una estructura hipotéticamente de dos capas las cuales están conformadas por una placa delgada que descansa sobre una base elástica. El módulo de elasticidad puede sobreestimarse o subestimarse en función de los valores de sección a lo largo de la curva de deflexión utilizada para determinar el módulo de la subrasante. El planteamiento, básicamente consiste en una capa rígida sobre un medio elástico, es práctico y simplifica el sistema elástico multicapa normal.

El modelo consiguió eliminar el sesgo de valoración o el error estadístico de los parámetros cuando se utilizó el modelo de Hoog, empleando la deflexión en el centro de la carga y una de las deflexiones adicionales fuera del punto de carga original. Dado que la distancia a la que la deflexión es la mitad de la deflexión máxima está regulada por estos parámetros, sus cálculos tienen en cuenta las diferencias de espesor del pavimento, así como la relación entre la rigidez del pavimento y la rigidez de la subrasante.

A.H.A. Hoog dio a conocer su trabajo sobre la creación del modelo de carga puntual y subrasante de espesor finito en 1944. El modelo para cargas dispersas y sus numerosas soluciones se publicaron en 1977.

A continuación, se presenta las ecuaciones que se emplean para el cálculo:

**Tabla 9:** Ecuaciones para la obtención de parámetros de evaluación

PARÁMETROS DE EVALUACIÓN- MÉTODO NUMÉRICO	ECUACIÓN	
Módulo de elasticidad de la subrasante según Hogg.	$E_{sg} = I \frac{(1 + u_0)(3 - 4u_0)}{2(1 - u_0)} \left[ \frac{S_0}{S} \right] \left[ \frac{P}{D_0 x L_0} \right]$	<b>A</b>
Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión máxima.	$r_{50} = R \frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} - B}{\left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{D_0}{D_R} - 1\right)\right]^{\frac{1}{\beta}} - B}$	<b>B</b>
Longitud característica de la curva de deflexión.	$L_0 = \frac{y_0 r_{50} + [(y_0 r_{50})^2 - 4mAr_{50}]^{\frac{1}{2}}}{2}$ Si $\frac{A}{L_0} < 0.2$ , entonces $L_0 = (y_0 - 2m)r_{50}$	<b>C</b>
Relación entre la rigidez por carga puntual y carga distribuida.	$\left(\frac{S_0}{S}\right) = 1 - \bar{m} \left(\frac{A}{L_0} - 0.1\right)$ Si $\frac{A}{L_0} < 0.2$ , entonces $\left(\frac{S_0}{S}\right) = 1$	<b>D</b>

Fuente: (Del Aguila Rodriguez, 2007, p. 2)

Donde:

- $E_{sg}$ : Módulo de elasticidad de la subrasante.
- $u_0$ : Coeficiente de Poisson de la subrasante.
- $S_0$ : Rigidez teórica por carga puntual.
- $S$ : Rigidez del pavimento =  $\frac{P}{D_0}$  (carga distribuida).
- $P$ : Carga aplicada.
- $D_0$ : Deflexión máxima.
- $D_R$ : Deflexión a una distancia radial R.
- $R$ : Distancia radial desde el punto inicial de carga.
- $r_{50}$ : Distancia radial donde  $\left(\frac{D_R}{D_0}\right) = 0.5$
- $L_0$ : Longitud característica.
- $H$ : Espesor de la subrasante.
- $I$ : Factor de influencia.
- $A$ : Radio de huella circular.
- $\alpha$ : Coeficiente de ajuste de curva, ver tabla 10.
- $\beta$ : Coeficiente de ajuste de curva, ver tabla 10.
- $B$ : Coeficiente de ajuste de curva, ver tabla 10.
- $y_0$ : Coeficiente para longitud característica, ver tabla 10.
- $m$ : Coeficiente para la longitud característica, ver tabla 10.
- $\bar{m}$ : Coeficiente para relación de rigidices, ver tabla 10.

Los coeficientes de ajuste de curvas, la longitud característica y la relación de rigidez del modelo de Hogg también se deducen en estas tres circunstancias, lo que permite resolver las ecuaciones precedentes. Utilizando diversos valores de Poisson, los casos I y II se trabajaron para valores de  $h/L_0$  iguales a 10, mientras que el caso III se trabajó para cualquier valor de  $h/L_0$  y cualquier valor del módulo de Poisson.

A continuación, se presentan los tres casos trabajados:

**Tabla 10:** Valor de coeficientes y variables de ajuste de curvas

Ecuación	CASOS		I	II	III
	Profundidad del estrato rígido	$\frac{h}{L_0}$	10	10	Infinito
Coefficiente de Poisson	$u_0$	0.50	0.40	Todos	
<b>A</b>	Factor de influencia	$I$	0.1614	0.1689	0.1925
<b>B</b>	Valor de $\frac{D_R}{D_0}$		>0.70	>0.426	Todos
	$r_{50} = f\left(\frac{D_R}{D_0}\right)$	$\frac{1}{\alpha}$	2.460	2.629	3.115
		$\frac{1}{\beta}$	0.592	0.548	0.584
		$B$	0	0	0
		Valor de $\frac{D_R}{D_0}$		<0.70	<0.426
	$r_{50} = f\left(\frac{D_R}{D_0}\right)$	$\frac{1}{\alpha}$	371.1	2283.4	
$\frac{1}{\beta}$		0.219	0.2004		
$B$		2	3		
<b>C</b>	$L_0 = f(r_{50}, \alpha)$	$y_0$	0.620	0.602	0.525
		$m$	0.183	0.192	0.180
<b>D</b>	$\frac{S_0}{S} = f\left(\frac{A}{L_0}\right)$	$\bar{m}$	0.52	0.48	0.44

Fuente: (Balarezo Zapata, 2017, p. 55)

(del Aguila Rodriguez, 2007), hace referencia a que el caso II del modelo de Hogg es el que ofrece resultados que son razonablemente estables para una amplia gama de tipos de pavimentos y localizaciones, dicha selección concuerda con los resultados que se obtuvo en los últimos 15 años en el proyecto de investigación a largo plazo sobre comportamiento de pavimentos en EE.UU. desde 1987 (Long Term Pavement Performance); asimismo, en dicho estudio se encontró una alta correlación de estos con los módulos de subrasante determinados por el análisis del retro cálculo mediante el software MODCOMP4, que posibilita la caracterización elástica no lineal de suelos y pavimentos.

El autor citado en el párrafo anterior precisa de un análisis de regresión donde se presenta la fórmula que demuestra un mejor ajuste, encontrándose un coeficiente de determinación de  $R^2=0.992$  para la siguiente expresión:

$$Esg = 1091314.96 * (D0 * R50)^{-0.939}$$

## **2.2.9. Correlación módulo resiliente – CBR**

### **2.2.9.1. Módulo resiliente**

Cuando los vehículos aplican solicitaciones de cargas a la estructura del pavimento, la subrasante se somete a una condición de tensiones fluctuantes y, posteriormente, a una condición de deformación, parte de la deformación se recupera cuando se retira la carga. De forma similar, la resiliencia del suelo se define como la capacidad de un suelo para recuperarse de un esfuerzo de solicitaciones carga cuando trabaja bajo deformaciones en una zona elástica supuesta, la relación entre el esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ) y la deformación unitaria recuperada ( $\epsilon_r$ ) se conoce como el módulo resiliente o de resiliencia del material del suelo ( $M_r$ ) (Rodrigo Osorio & Vidal Valencia, 2002, p. 64).

La reacción de un material cuando se retira una carga, el pavimento recupera parte de la deformación producida; esta capacidad de rebote es lo que se conoce como resiliencia del material. El módulo resistente es el producto de la tensión desviador y la respectiva deformación unitaria recuperable (Rodrigo Osorio & Vidal Valencia, 2002, p. 65).

### **2.2.9.2. Correlación del módulo resiliente con el ensayo CBR**

El desarrollo de correlaciones entre el módulo de elasticidad y otros ensayos utilizados a menudo en el diseño de los espesores de las estructuras de los pavimentos ha sido el objetivo de muchos investigadores. La correlación con el CBR ha sido la más utilizada. Es crucial recordar que muchas de las correlaciones son más bien de tipo regional, lo que debería limitar el uso de cualquier tipo de suelo para un proyecto en específico. Es importante señalar que el ingeniero sólo podrá elegir la mejor correlación para un determinado proyecto con mucho conocimiento y criterio (Rodrigo Osorio & Vidal Valencia, 2002, p. 68).

A continuación, se muestra algunas correlaciones entre el CBR y el módulo resiliente según distintos autores:

- Shell (Heukelomm y Foster 1960).

$$M_r (\text{psi}) = 1500 * (\text{CBR})$$

- U.S. Cuerpos de Ingenieros (USACE) (Green y Hall 1975).

$$M_r (\text{psi}) = 5049 * (\text{CBR})^{0.711}$$

- Concilio Sur Africano de Investigaciones Científicas e Industriales (CSIR).

$$M_r (\text{psi}) = 3000 * (\text{CBR})^{0.65}$$

- Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras (TRRL) (Lister 1987).

$$M_r (\text{psi}) = 2555 * (\text{CBR})^{0.64}$$



Para el presente trabajo se utilizará esta última correlación, que es la misma que se aplica en el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014.

Es importante resaltar que la representación de las ecuaciones tiene la siguiente forma:

$$Mr = K * (CBR)^n$$



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1. Tipo de investigación

Es aplicada, se denomina aplicada porque las soluciones que produce pueden utilizarse de forma inmediata para abordar los problemas que les atañe. Los resultados, conclusiones y recomendaciones sirven de base a la investigación aplicada (José Salinas, 2010, p. 17).

La presente investigación es de enfoque cuantitativo, la recopilación de datos se utiliza para probar hipótesis basadas en mediciones numéricas y análisis estadísticos, identificar pautas de comportamientos y comprobar hipótesis (Hernández Sampieri et al., 2006).

##### 3.1.2. Nivel de investigación

Descriptivo – Correlacional: “Los estudios correlacionales son un tipo de investigación descriptiva que intenta determinar el grado de relación existente entre las variables”.(Ary et al., 1989, como se citó en Arias, 2012, p. 26)

En esta investigación, a través de los datos obtenidos del análisis deflectométrico con Viga Benkelman se busca el nivel de confiabilidad respecto a los ensayos de CBR para estimar el módulo resiliente de una subrasante, así mismo, se describe el comportamiento que se obtiene en la interacción subrasante-pavimento en la carretera Puno – Tiquillaca, Tramo Km 46+000 al Km 50+000 con fines de intervención futura a nivel de mantenimiento y rehabilitación.

### 3.1.3. Diseño de investigación

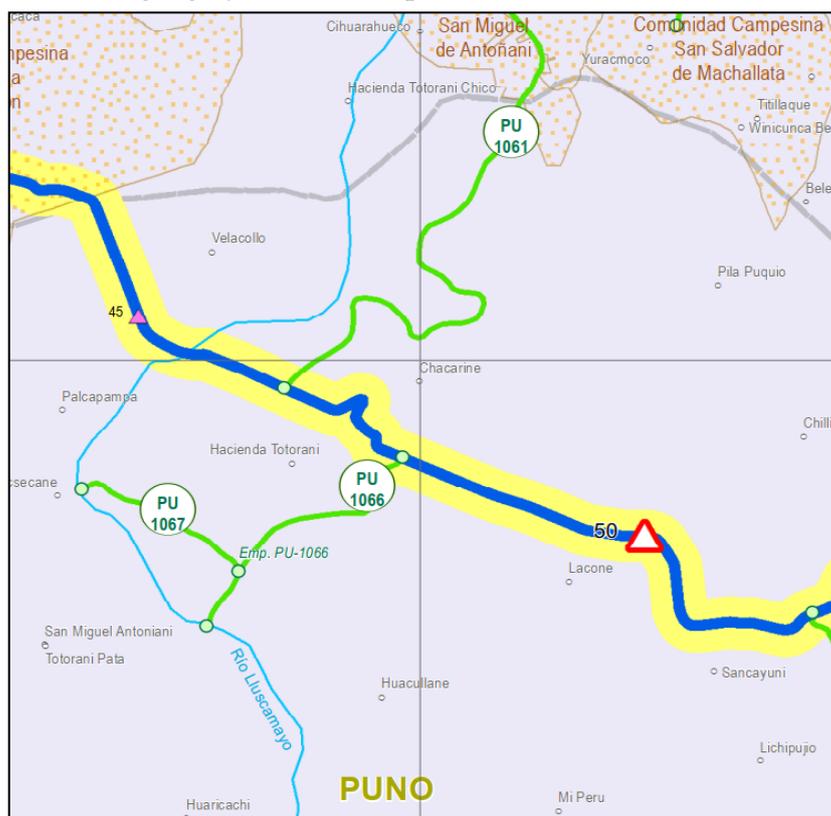
No experimental: “En la investigación no experimental las variables independientes ocurren y no es posible manipularlas, no se tiene control directo sobre dichas variables ni se puede influir en ellas, porque ya sucedieron, al igual que sus efectos”. (Hernández Sampieri et al., 2014, p. 152)

### 3.1.4. Ubicación geográfica del estudio

El tramo evaluado forma parte de la Ruta PE-34U reclasificado temporalmente mediante Resolución Ministerial N°270-2014-MTC/02, ubicado en el sur este del Perú, a una altura promedio de 3865 msnm, entre las progresivas Km 46+000 al Km 50+000 que une los distritos de Puno y Tiquillaca, Provincia de Puno, Departamento de Puno.

#### Figura 17

Ubicación geográfica, Puno-Tiquillaca



Fuente: Mapa vial – MTC

### 3.1.5. Población

Según refiere (Arias, 2012, p. 81), “La población es un conjunto limitado con características similares para los cuales las conclusiones de la investigación serán extensas. Esta queda limitada por los objetivos y el problema de investigación”.

Para el presente estudio, la población está conformado por la longitud total de 4,000m (4km), que se comprende entre las progresivas del km 46+000 al km 50+000 de la Ruta PE-34U, así mismo, la ubicación en UTM del inicio y fin de las mismas se detallan a continuación:

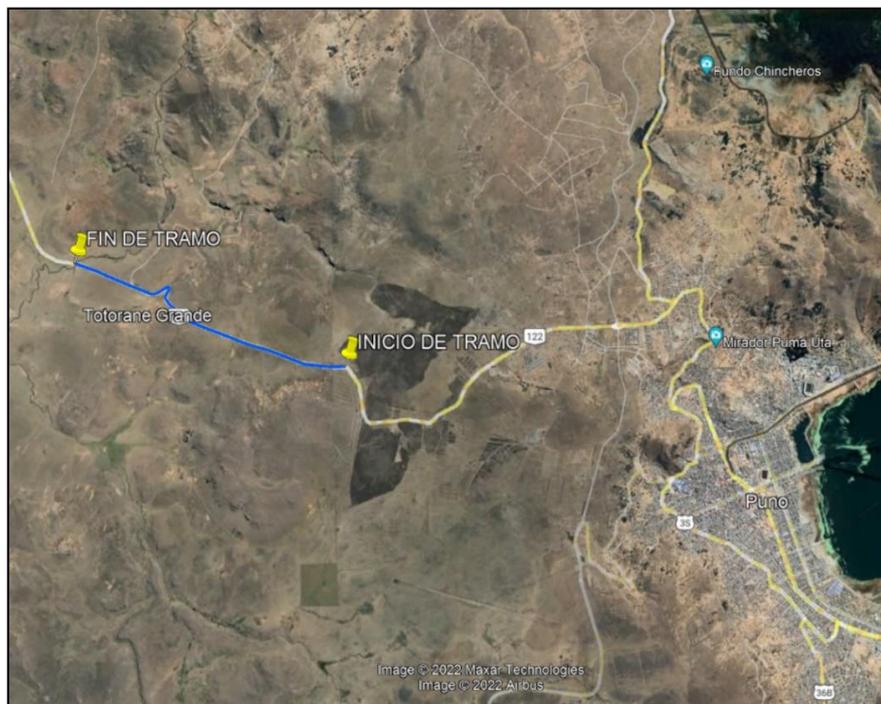
**Tabla 11:** *Coordenadas UTM de inicio y fin del tramo*

UBICACIÓN			COORDENADAS UTM		
RUTA	PUNTO	PROGRESIVA	ESTE	NORTE	ZONA
PE-34U	INICIO	50+000	384837.00	8250378.00	19L
	FIN	46+000	381107.00	8251850.00	

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### Figura 18

*Ubicación de tramo, km 46+000 al km 50+000*



*Fuente:* Google Earth

### 3.1.6. Muestra

Se trata de un muestreo no probabilístico, en el que la selección de los componentes no se basa en la probabilidad, sino en factores relacionados con las características o los objetivos de la investigación (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Batista Lucio, 2014).

Para la evaluación de deflexiones con Viga Benkelman se consideró 161 puntos a cada 25 metros en calzada de forma alternada acorde al manual de ensayo MTC E-1002: “Medida de la deflexión de un pavimento flexible empleando la Viga Benkelman”, tal como se presenta a continuación:

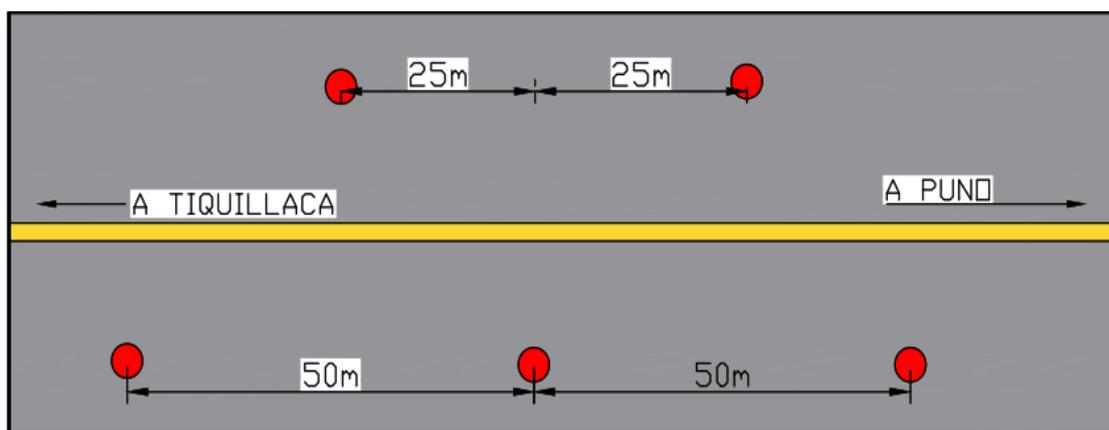
**Tabla 12:** Número de puntos de muestreo para análisis deflectométrico

ENSAYO	Long. Total	Distancia entre puntos de muestreo	Nº de puntos de muestreo	Nº de puntos de muestreo - Lado Izquierdo	Nº de puntos de muestreo - Lado Derecho
DEFLECTOMETRIA (VIGA BENKELMAN)	4000m	25m	161	80	81

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

#### Figura 19

Diagrama de medición de viga benkelman



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Asimismo, para determinar las características físico-mecánicas de material de subrasante comprendida entre las progresivas del km 46+000 al km 50+000 se efectuarán

pozos exploratorios con una frecuencia acorde al número de sectores homogéneos que se sean calculados de acuerdo a la evaluación deflectométrica, para ello, se efectuará el método de diferencias acumuladas recomendada por la AASHTO93, el cual, se explica párrafos más adelante.

**Tabla 13:** Descripción de puntos de evaluación para ensayos de laboratorio y densidad natural

SECTORIZACION	SECTORES HOMOGÉNEOS	PUNTOS DE EVALUACIÓN DE DENSIDAD NATURAL	PUNTOS DE MUESTREO PARA ENSAYOS DE LABORATORIO	DESCRIPCIÓN
Metodología de diferencias acumuladas recomendada por la AASHTO93	04 sectores Homogéneos	08 puntos (02 por sector homogéneo)	04 pozos exploratorios	La ubicación de los puntos de evaluación se realizará de forma alternada

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

**Tabla 14:** Número de puntos de evaluación por sectores homogéneos

Sectores homogéneos			Puntos de muestreo para ensayos en laboratorio			Puntos de evaluación para densidad natural		
Sector	PK inicial	PK final	Muestra	Ubicación Km	Lado	Punto	Ubicación Km	Lado
1	46+000	46+750	M-01	46+460	Derecho	01	46+050	Derecho
						02	46+460	Derecho
2	46+750	48+100	M-02	47+610	Derecho	03	47+610	Derecho
						04	47+830	Izquierdo
3	48+100	49+550	M-03	48+200	Derecho	05	48+200	Derecho
						06	48+740	Derecho
4	49+550	50+000	M-04	49+840	Izquierdo	07	49+670	Izquierdo
						08	49+840	Izquierdo

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### 3.2. DESCRIPCIÓN DEL SECTOR EN ESTUDIO

El sector en estudio queda comprendido entre las progresivas del km 46+000 al km 50+000 (Longitud: 4.00 Km) de la ruta PE-34U: Emp. PE-34 A (Dv. Mañazo) - Mañazo - Vilque - Tiquillaca - Emp. PE-3S (Dv. Ccellacce) reclasificado temporalmente mediante Resolución Ministerial N°270-2014-MTC/02 de fecha 19/05/2014; es una vía de doble sentido, con un carril por sentido, cuenta con un ancho de calzada de 7.40m, no

presenta separador central, la superficie de rodadura es de Tratamiento Superficial Doble TSB de 0.025m y base tratada con asfalto de 0.15m, cuenta con cunetas y obras de arte en sectores específicos tanto en el margen derecho e izquierdo, el perfil estratigráfico encontrado se adjunta en el Anexo 04.

**Figura 20**

*Medición de calzada de la carretera Puno - Tiquillaca, km 48+000*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

**Figura 21**

*Medición de ancho de carril en calzada, km 49+000*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### 3.3. TRAMIFICACIÓN DE SECTORES HOMOGÉNEOS

Para un mejor análisis de los resultados, el tramo estudiado se sectorizó u agrupó convenientemente según su comportamiento estructural (Deflexión máxima), para definir las zonas homogéneas se utilizará la metodología de Diferencias acumuladas recomendada por la AASHTO93.

#### 3.3.1. Metodología de las diferencias acumuladas

Con el fin de establecer sectores de comportamiento homogéneo para el análisis de resultados, se ha realizado una sectorización del tramo en fracciones homogéneas, considerando como criterios de sectorización las diferencias acumuladas ( $Z_x$ ) de la deflexión máxima normalizada ( $D_0$ ). Esta metodología se denomina de las Diferencias Acumuladas. (AASHTO, 1993)

El proceso analítico de Diferencias Acumuladas se basa en la observación matemática de que cuando la variable  $Z_x$ , definida como la diferencia entre el área bajo la curva a una distancia “x” y el área cubierta por el promedio general del parámetro a esta misma distancia, se representa gráficamente en función de la distancia a lo largo de la sección analizada, de esa manera se puede definir sectores homogéneos donde la pendiente de esta curva cambia de orientación. A continuación, a manera de ejemplo se muestra el procedimiento empleado para el cálculo de las diferencias acumuladas.

- En primer lugar, se tabula los datos de  $D_0$  ( $D_{max.}$ ) (columna 2) 1/100 mm y progresivas (columna 1).
- Luego, se enumera el número de intervalos (columna 3) y las distancias entre cada progresiva (columna 4), que para el caso nuestro es de 25m de forma alternada en el carril derecho e izquierdo a fin de calcular la distancia acumulada entre intervalos (columna 5), que es la sumatoria acumulada de las distancias de los intervalos (columna 4).



- Posteriormente, se calcula el intervalo promedio (columna 6) y área del intervalo (columna 7) de acuerdo a las fórmulas indicadas en el numeral 2.2.5 del Capítulo II.

Col. (6)

$$\begin{aligned}\bar{r}_1 &= r_1 \\ \bar{r}_2 &= \frac{r_1 + r_2}{2} \\ \bar{r}_n &= \frac{r_{n-1} + r_n}{2}\end{aligned}$$

Col. (7)

$$\begin{aligned}a_1 &= 0 \\ a_2 &= \Delta X_2 x \bar{r}_2 \\ a_n &= \Delta X_n x \bar{r}_n\end{aligned}$$

- Se calcula el área acumulada (columna 8), que es la sumatoria acumulada del área de intervalo (columna 7).
- Finalmente, se calcula el valor de Zx de acuerdo a la formula indicada en el numeral 2.2.5 del Capítulo II.

Col. (9)

$$\begin{aligned}ZX_1 &= 0 \\ ZX_2 &= \sum a_2 - (F x \sum \Delta X_2) \\ ZX_n &= \sum a_n - (F x \sum \Delta X_n)\end{aligned}$$

A continuación, se presenta el procesamiento del tramo analizado (km 46+000 al km 50+000):



**Tabla 15:** Cálculo de valores  $Z_x$  por el método de diferencias acumuladas de la AASHTO 93

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Carril	Progresiva	D0 (Dmax.) 1/100 mm	# Intervalo	Dist. Entre intervalo	Dist. Acumulada entre intervalos	Intervalo promedio	Área del intervalo	Área acumulada	$Z_x$
Derecho	46+000	34	1	25	25	34.2	855.11	855.11	-911.36
Izquierdo	46+025	66	2	25	50	50.085111	1,252.13	2,107.24	-1,425.71
Derecho	46+050	59	3	25	75	62.312004	1,557.80	3,665.04	-1,634.38
Izquierdo	46+075	105	4	25	100	81.877144	2,046.93	5,711.97	-1,353.93
Derecho	46+100	78	5	25	125	91.658417	2,291.46	8,003.43	-828.94
Izquierdo	46+125	76	6	25	150	76.998597	1,924.96	9,928.39	-670.45
Derecho	46+150	83	7	25	175	79.448202	1,986.21	11,914.60	-450.72
Izquierdo	46+175	61	8	25	200	72.118829	1,802.97	13,717.57	-414.22
Derecho	46+200	54	9	25	225	57.453961	1,436.35	15,153.92	-744.35
Izquierdo	46+225	54	10	25	250	53.79027	1,344.76	16,498.68	-1,166.07
Derecho	46+250	39	11	25	275	46.457193	1,161.43	17,660.10	-1,771.11
Izquierdo	46+275	46	12	25	300	42.792003	1,069.80	18,729.90	-2,467.78
Derecho	46+300	73	13	25	325	59.91248	1,497.81	20,227.72	-2,736.45
Izquierdo	46+325	49	14	25	350	61.13756	1,528.44	21,756.16	-2,974.48
Derecho	46+350	46	15	25	375	47.690207	1,192.26	22,948.41	-3,548.70
Izquierdo	46+375	61	16	25	400	53.807794	1,345.19	24,293.61	-3,969.98
Derecho	46+400	32	17	25	425	46.471961	1,161.80	25,455.40	-4,574.65
Izquierdo	46+425	59	18	25	450	45.251999	1,131.30	26,586.70	-5,209.83
Derecho	46+450	66	19	25	475	62.377687	1,559.44	28,146.15	-5,416.86
Izquierdo	46+475	59	20	25	500	62.38063	1,559.52	29,705.66	-5,623.82
Derecho	46+500	49	21	25	525	53.821649	1,345.54	31,051.20	-6,044.75
Izquierdo	46+525	71	22	25	550	59.941843	1,498.55	32,549.75	-6,312.68
Derecho	46+550	71	23	25	575	70.955127	1,773.88	34,323.63	-6,305.27
Izquierdo	46+575	71	24	25	600	70.958684	1,773.97	36,097.60	-6,297.78
Derecho	46+600	56	25	25	625	63.620953	1,590.52	37,688.12	-6,473.73
Izquierdo	46+625	73	26	25	650	64.848059	1,621.20	39,309.32	-6,619.00
Derecho	46+650	73	27	25	675	73.416579	1,835.41	41,144.74	-6,550.06
Izquierdo	46+675	64	28	25	700	68.525577	1,713.14	42,857.87	-6,603.40
Derecho	46+700	61	29	25	725	62.41029	1,560.26	44,418.13	-6,809.61
Izquierdo	46+725	64	30	25	750	62.413482	1,560.34	45,978.47	-7,015.75
Derecho	46+750	56	31	25	775	59.968718	1,499.22	47,477.69	-7,283.01
Izquierdo	46+775	117	32	25	800	86.898074	2,172.45	49,650.14	-6,877.03
Derecho	46+800	73	33	25	825	95.469173	2,386.73	52,036.87	-6,256.77
Izquierdo	46+825	64	34	25	850	68.546202	1,713.66	53,750.52	-6,309.59
Derecho	46+850	61	35	25	875	62.428309	1,560.71	55,311.23	-6,515.36
Izquierdo	46+875	49	36	25	900	55.085915	1,377.15	56,688.38	-6,904.69
Derecho	46+900	76	37	25	925	62.434512	1,560.86	58,249.24	-7,110.30
Izquierdo	46+925	66	38	25	950	71.006748	1,775.17	60,024.41	-7,101.60
Derecho	46+950	98	39	25	975	82.029952	2,050.75	62,075.16	-6,817.33
Izquierdo	46+975	98	40	25	1000	97.950172	2,448.75	64,523.91	-6,135.05
Derecho	47+000	73	41	25	1025	85.711931	2,142.80	66,666.71	-5,758.72



0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Carril	Progresiva	D0 (Dmax.) 1/100 mm	# Intervalo	Dist. Entre intervalo	Dist. Acumulada entre intervalos	Intervalo promedio	Área del intervalo	Área acumulada	Zx
Izquierdo	47+025	66	42	25	1050	69.800005	1,745.00	68,411.71	-5,780.20
Derecho	47+050	96	43	25	1075	80.825853	2,020.65	70,432.36	-5,526.02
Izquierdo	47+075	103	44	25	1100	99.199438	2,479.99	72,912.34	-4,812.51
Derecho	47+100	49	45	25	1125	75.932893	1,898.32	74,810.67	-4,680.66
Izquierdo	47+125	73	46	25	1150	61.240368	1,531.01	76,341.68	-4,916.13
Derecho	47+150	96	47	25	1175	84.518903	2,112.97	78,454.65	-4,569.63
Izquierdo	47+175	71	48	25	1200	83.299445	2,082.49	80,537.13	-4,253.62
Derecho	47+200	76	49	25	1225	73.503324	1,837.58	82,374.72	-4,182.51
Izquierdo	47+225	91	50	25	1250	83.30781	2,082.70	84,457.41	-3,866.29
Derecho	47+250	69	51	25	1275	79.635911	1,990.90	86,448.31	-3,641.86
Izquierdo	47+275	74	52	25	1300	71.063798	1,776.59	88,224.91	-3,631.74
Derecho	47+300	69	53	25	1325	71.066382	1,776.66	90,001.56	-3,621.56
Izquierdo	47+325	59	54	25	1350	63.71717	1,592.93	91,594.49	-3,795.10
Derecho	47+350	61	55	25	1375	60.044256	1,501.11	93,095.60	-4,060.47
Izquierdo	47+375	93	56	25	1400	77.203556	1,930.09	95,025.69	-3,896.86
Derecho	47+400	98	57	25	1425	95.589048	2,389.73	97,415.42	-3,273.60
Izquierdo	47+425	76	58	25	1450	87.013737	2,175.34	99,590.76	-2,864.73
Derecho	47+450	42	59	25	1475	58.828282	1,470.71	101,061.47	-3,160.50
Izquierdo	47+475	69	60	25	1500	55.155092	1,378.88	102,440.34	-3,548.10
Derecho	47+500	71	61	25	1525	69.866688	1,746.67	104,187.01	-3,567.90
Izquierdo	47+525	74	62	25	1550	72.32172	1,808.04	105,995.05	-3,526.34
Derecho	47+550	74	63	25	1575	73.550283	1,838.76	107,833.81	-3,454.05
Izquierdo	47+575	69	64	25	1600	71.101286	1,777.53	109,611.34	-3,442.99
Derecho	47+600	96	65	25	1625	82.137848	2,053.45	111,664.79	-3,156.02
Izquierdo	47+625	101	66	25	1650	98.078131	2,451.95	114,116.74	-2,470.54
Derecho	47+650	78	67	25	1675	89.499251	2,237.48	116,354.22	-1,999.54
Izquierdo	47+675	78	68	25	1700	78.468419	1,961.71	118,315.93	-1,804.30
Derecho	47+700	75	69	25	1725	76.9646	1,924.11	120,240.05	-1,646.66
Izquierdo	47+725	83	70	25	1750	79.112109	1,977.80	122,217.85	-1,435.33
Derecho	47+750	78	71	25	1775	80.35449	2,008.86	124,226.71	-1,192.94
Izquierdo	47+775	97	72	25	1800	87.688737	2,192.22	126,418.93	-767.2
Derecho	47+800	88	73	25	1825	92.580038	2,314.50	128,733.43	-219.17
Izquierdo	47+825	78	74	25	1850	82.854361	2,071.36	130,804.79	85.71
Derecho	47+850	63	75	25	1875	70.674642	1,766.87	132,571.66	86.11
Izquierdo	47+875	80	76	25	1900	71.899113	1,797.48	134,369.14	117.11
Derecho	47+900	102	77	25	1925	91.40357	2,285.09	136,654.23	635.73
Izquierdo	47+925	85	78	25	1950	93.846154	2,346.15	139,000.38	1,215.41
Derecho	47+950	85	79	25	1975	85.320013	2,133.00	141,133.38	1,581.93
Izquierdo	47+975	59	80	25	2000	71.917073	1,797.93	142,931.31	1,613.38
Derecho	48+000	63	81	25	2025	60.960927	1,524.02	144,455.33	1,370.93
Izquierdo	48+025	49	82	25	2050	56.096159	1,402.40	145,857.73	1,006.86
Derecho	48+050	83	83	25	2075	65.857194	1,646.43	147,504.16	886.82
Izquierdo	48+075	54	84	25	2100	68.29951	1,707.49	149,211.65	827.83
Derecho	48+100	85	85	25	2125	69.523412	1,738.09	150,949.74	799.44



0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Carril	Progresiva	D0 (Dmax.) 1/100 mm	# Intervalo	Dist. Entre intervalo	Dist. Acumulada entre intervalos	Intervalo promedio	Área del intervalo	Área acumulada	Zx
Izquierdo	48+125	61	86	25	2150	73.185363	1,829.63	152,779.37	862.6
Derecho	48+150	95	87	25	2175	78.072712	1,951.82	154,731.19	1,047.95
Izquierdo	48+175	51	88	25	2200	73.19817	1,829.95	156,561.14	1,111.43
Derecho	48+200	85	89	25	2225	68.322562	1,708.06	158,269.21	1,053.02
Izquierdo	48+225	56	90	25	2250	70.765307	1,769.13	160,038.34	1,055.68
Derecho	48+250	78	91	25	2275	67.109914	1,677.75	161,716.09	966.95
Izquierdo	48+275	71	92	25	2300	74.434887	1,860.87	163,576.96	1,061.35
Derecho	48+300	93	93	25	2325	81.763309	2,044.08	165,621.04	1,338.96
Izquierdo	48+325	107	94	25	2350	100.07503	2,501.88	168,122.92	2,074.36
Derecho	48+350	100	95	25	2375	103.74131	2,593.53	170,716.45	2,901.42
Izquierdo	48+375	61	96	25	2400	80.55625	2,013.91	172,730.36	3,148.85
Derecho	48+400	39	97	25	2425	50.044473	1,251.11	173,981.47	2,633.49
Izquierdo	48+425	134	98	25	2450	86.667667	2,166.69	176,148.16	3,033.71
Derecho	48+450	54	99	25	2475	93.995055	2,349.88	178,498.04	3,617.11
Izquierdo	48+475	66	100	25	2500	59.820379	1,495.51	179,993.55	3,346.14
Derecho	48+500	85	101	25	2525	75.696437	1,892.41	181,885.96	3,472.08
Izquierdo	48+525	71	102	25	2550	78.142514	1,953.56	183,839.52	3,659.17
Derecho	48+550	76	103	25	2575	73.263343	1,831.58	185,671.10	3,724.28
Izquierdo	48+575	61	104	25	2600	68.383255	1,709.58	187,380.68	3,667.39
Derecho	48+600	46	105	25	2625	53.732603	1,343.32	188,724.00	3,244.23
Izquierdo	48+625	37	106	25	2650	41.5236	1,038.09	189,762.09	2,515.84
Derecho	48+650	78	107	25	2675	57.404183	1,435.10	191,197.19	2,184.47
Izquierdo	48+675	49	108	25	2700	63.51304	1,587.83	192,785.02	2,005.83
Derecho	48+700	83	109	25	2725	65.961047	1,649.03	194,434.05	1,888.38
Izquierdo	48+725	64	110	25	2750	73.293449	1,832.34	196,266.38	1,954.24
Derecho	48+750	83	111	25	2775	73.299688	1,832.49	198,098.88	2,020.26
Izquierdo	48+775	51	112	25	2800	67.195754	1,679.89	199,778.77	1,933.68
Derecho	48+800	73	113	25	2825	62.312461	1,557.81	201,336.58	1,725.02
Izquierdo	48+825	51	114	25	2850	62.31503	1,557.88	202,894.46	1,516.42
Derecho	48+850	78	115	25	2875	64.764632	1,619.12	204,513.57	1,369.06
Izquierdo	48+875	61	116	25	2900	69.656675	1,741.42	206,254.99	1,344.00
Derecho	48+900	83	117	25	2925	72.108053	1,802.70	208,057.69	1,380.23
Izquierdo	48+925	81	118	25	2950	81.891499	2,047.29	210,104.98	1,661.04
Derecho	48+950	73	119	25	2975	77.007047	1,925.18	212,030.15	1,819.75
Izquierdo	48+975	73	120	25	3000	73.344856	1,833.62	213,863.78	1,886.89
Derecho	49+000	59	121	25	3025	66.01331	1,650.33	215,514.11	1,770.75
Izquierdo	49+025	95	122	25	3050	77.019816	1,925.50	217,439.60	1,929.77
Derecho	49+050	95	123	25	3075	95.363841	2,384.10	219,823.70	2,547.40
Izquierdo	49+075	73	124	25	3100	84.365604	2,109.14	221,932.84	2,890.06
Derecho	49+100	95	125	25	3125	84.371579	2,109.29	224,042.13	3,232.88
Izquierdo	49+125	90	126	25	3150	92.936076	2,323.40	226,365.53	3,789.80
Derecho	49+150	61	127	25	3175	75.819337	1,895.48	228,261.01	3,918.81
Izquierdo	49+175	81	128	25	3200	70.93201	1,773.30	230,034.31	3,925.64
Derecho	49+200	100	129	25	3225	90.505745	2,262.64	232,296.96	4,421.81



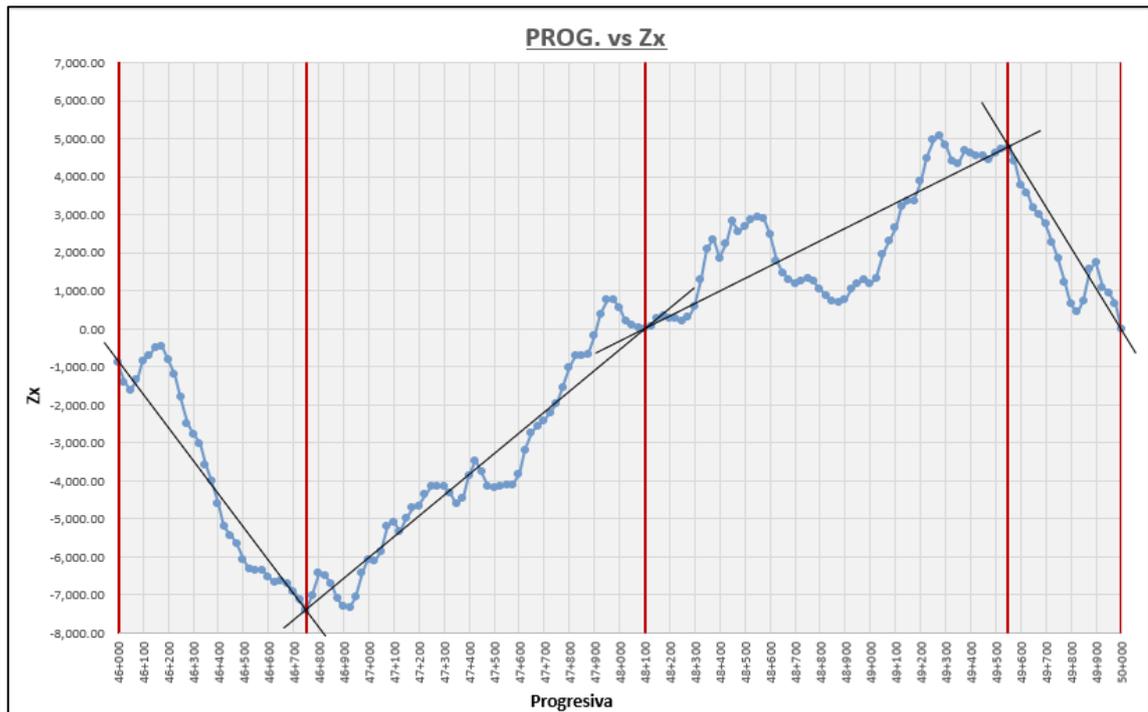
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Carril	Progresiva	D0 (Dmax.) 1/100 mm	# Intervalo	Dist. Entre intervalo	Dist. Acumulada entre intervalos	Intervalo promedio	Área del intervalo	Área acumulada	Zx
Izquierdo	49+225	91	130	25	3250	95.403278	2,385.08	234,682.04	5,040.42
Derecho	49+250	88	131	25	3275	89.293202	2,232.33	236,914.37	5,506.27
Izquierdo	49+275	61	132	25	3300	74.619607	1,865.49	238,779.86	5,605.29
Derecho	49+300	59	133	25	3325	59.944757	1,498.62	240,278.48	5,337.43
Izquierdo	49+325	49	134	25	3350	53.832076	1,345.80	241,624.28	4,916.76
Derecho	49+350	86	135	25	3375	67.295463	1,682.39	243,306.67	4,832.68
Izquierdo	49+375	81	136	25	3400	83.205456	2,080.14	245,386.80	5,146.34
Derecho	49+400	56	137	25	3425	68.532729	1,713.32	247,100.12	5,093.18
Izquierdo	49+425	78	138	25	3450	67.323852	1,683.10	248,783.22	5,009.80
Derecho	49+450	61	139	25	3475	69.775063	1,744.38	250,527.60	4,987.71
Izquierdo	49+475	69	140	25	3500	64.882222	1,622.06	252,149.65	4,843.29
Derecho	49+500	88	141	25	3525	78.353872	1,958.85	254,108.50	5,035.66
Izquierdo	49+525	61	142	25	3550	74.685132	1,867.13	255,975.63	5,136.32
Derecho	49+550	81	143	25	3575	71.01919	1,775.48	257,751.11	5,145.32
Izquierdo	49+575	29	144	25	3600	55.105267	1,377.63	259,128.74	4,756.48
Derecho	49+600	61	145	25	3625	45.313385	1,132.83	260,261.57	4,122.84
Izquierdo	49+625	61	146	25	3650	61.237295	1,530.93	261,792.50	3,887.30
Derecho	49+650	47	147	25	3675	53.892324	1,347.31	263,139.81	3,468.13
Izquierdo	49+675	78	148	25	3700	62.471448	1,561.79	264,701.60	3,263.44
Derecho	49+700	42	149	25	3725	60.024724	1,500.62	266,202.22	2,997.59
Izquierdo	49+725	59	150	25	3750	50.229709	1,255.74	267,457.96	2,486.86
Derecho	49+750	47	151	25	3775	52.682861	1,317.07	268,775.03	2,037.45
Izquierdo	49+775	42	152	25	3800	44.109672	1,102.74	269,877.77	1,373.72
Derecho	49+800	54	153	25	3825	47.789539	1,194.74	271,072.51	801.99
Izquierdo	49+825	69	154	25	3850	61.272663	1,531.82	272,604.33	567.33
Derecho	49+850	96	155	25	3875	82.112571	2,052.81	274,657.14	853.67
Izquierdo	49+875	113	156	25	3900	104.17922	2,604.48	277,261.62	1,691.68
Derecho	49+900	39	157	25	3925	75.992015	1,899.80	279,161.42	1,825.00
Izquierdo	49+925	49	158	25	3950	44.128507	1,103.21	280,264.64	1,161.74
Derecho	49+950	78	159	25	3975	63.74709	1,593.68	281,858.31	988.94
Izquierdo	49+975	39	160	25	4000	58.846879	1,471.17	283,329.49	693.64
Derecho	50+000	47	161	25	4025	42.913279	1,072.83	284,402.32	0
<b>At</b>								<b>284,402.32</b>	
<b>Lp</b>								<b>4,025.00</b>	
<b>F</b>								<b>70.66</b>	

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

Así mismo, se presenta la siguiente grafica de “Progresiva Vs Zx”, de la cual se ha identificado los intervalos que contengan cambios de pendiente, para finalmente dar como resultado la tramificación de los sectores homogéneos.

**Figura 22**

*Tramificación de sectores homogéneos por diferencias acumuladas*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

Según la gráfica anterior, se identifica (04) cuatro sectores homogéneos, en consecuencia, se realizará (04) cuatro pozos exploratorios para el muestreo de suelo que será ensayado en laboratorio; así mismo, se realizará ocho puntos de densidad de campo (dos por sector homogéneo) para comprobar la densidad in situ, tal como se describe en la Tabla 14.

### **3.4. CARACTERIZACIÓN FÍSICA – MECÁNICA DEL MATERIAL DE SUBRASANTE**

#### **3.4.1. Caracterización física del material de subrasante**

Para poder caracterizar físicamente la subrasante del pavimento, se realizó ensayos de granulometría, contenido de humedad, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad a fin de identificar el tipo de suelo por la metodología SUCS Y AASHTO, por lo que, a continuación, se realiza una breve descripción, así como también se muestra los resultados obtenidos de los ensayos realizados.

**Tabla 16:** *Ensayos de laboratorio para la caracterización física de subrasante*

ENSAYO	NORMA	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	MTC E 107	ASTM D 422
CONTENIDO DE HUMEDAD	MTC E 108	ASTM D 2216
LÍMITE LÍQUIDO	MTC E 110	NTP 339.129
LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD	MTC E 111	NTP 339.129

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

#### A) Contenido de humedad (MTC E 108)

- **Descripción:**

Según el (MTC, 2016, p. 51) , la prueba se realiza secando el suelo húmedo hasta un peso seco constante en un horno controlado a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ . El resultado se expresa como una proporción del peso del agua en una masa determinada de suelo con respecto al peso de las partículas sólidas.

- **Resultados:**

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 17:** *Resultados de contenido de humedad natural de la muestra de suelo*

PUNTO	UBICACIÓN	LADO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
1	46+050	Derecho	4.8
2	46+460	Derecho	4.9
3	47+610	Derecho	5.1
4	47+830	Izquierdo	6.1
5	48+200	Derecho	6.4
6	48+740	Derecho	6.0
7	49+670	Izquierdo	6.1
8	49+840	Izquierdo	6.2

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

**Figura 23**

*Peso de material para contenido de humedad*



*Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo*

**Figura 24**

*Peso de tara con muestra*



*Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo*

## B) Análisis granulométrico por tamizado (MTC E 107)

### • Descripción:

Según el (MTC, 2016, p. 47), el ensayo determina los porcentajes de suelos que pasan por los distintos tamices empleada en el ensayo, es decir, determina el tamaño de las partículas del suelo por medio de tamices normalizados y de esa forma encuentra la curva granulométrica.

### • Resultados:

A continuación, se muestra el % porcentaje que pasa para cada muestra:

**Tabla 18:** Resultados de Análisis Granulométrico - % que pasa

MUE STRA	UBICA CIÓN	LADO	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO % QUE PASA									
			2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	N° 4	N°10	N° 40	N° 60	N° 200
M-01	46+460	Der.	100	99.2	87.1	71.3	50.0	38.0	28.9	18.2	15.6	9.2
M-02	47+610	Der.	-	100	94.2	86.9	71.5	59.5	46.4	29.7	25.1	15.9
M-03	48+200	Der.	100	99.4	91.9	86.4	69.9	57.2	45.1	27.8	22.6	12.1
M-04	49+840	Izq.	100	96.3	89.2	83.5	69.8	56.8	44.1	28.4	23.7	12.8

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

De la anterior tabla se deduce lo siguiente:

- El tamaño máximo para las muestras 01, 03 y 04 es de 2"; mientras que para la muestra 02 es de 1 1/2".
- El tamaño máximo nominal para las muestras 01, 03 y 04 es de 1 1/2"; mientras que para la muestra 02 es de 1".
- El porcentaje (%) que pasa el tamiz N°4 de las muestras 01, 02, 03, 04 es de 38.0, 59.5, 57.2 y 56.8 respectivamente.

- El porcentaje (%) que pasa el tamiz N°200 de las muestras 01, 02, 03, 04 es de 9.2, 15.9, 12.1 y 12.8 respectivamente.

### Figura 25

#### Lavado de muestra para el análisis granulométrico



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

### Figura 26

#### Ensayo de análisis granulométrico



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

### C) Límite líquido (MTC E 110)

- **Descripción:**

Según el (MTC, 2016, p. 67), es la condición del suelo en el que se encuentra en el límite entre los estados líquido y plástico, el ensayo determina el contenido de humedad expresado en porcentaje. Arbitrariamente se designa como el contenido de humedad al cual el surco separador de dos mitades de una pasta de suelo se cierra a lo largo de su fondo en una distancia de 13 mm (1/2 pulg) cuando se deja caer la copa 25 veces desde una altura de 1 cm a razón de dos caídas por segundo.

- **Resultados:**

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 19:** Resultados de Límite Líquido

MUESTRA	UBICACIÓN	LADO	LÍMITE LÍQUIDO %
M-01	46+460	Derecho	NP
M-02	47+610	Derecho	21.56
M-03	48+200	Derecho	20.57
M-04	49+840	Izquierdo	NP

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### Figura 27

*Ensayo de L.L. – Aplicación de golpes en la cuchara de casagrande*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

## Figura 28

Ensayo de L.L. – saturación de las muestras



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

### D) Límite plástico e índice de plasticidad (MTC E 111):

#### • Descripción:

Según el (MTC, 2016, p. 72), se denomina límite plástico (L.P.) a la humedad más baja con la que pueden formarse barras de material de 3,2 mm (1/8") de diámetro, para ello se tiene que rodar el suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa (vidrio), sin permitir que dichas barritas se desmoronen, así mismo, se puede determinar el índice de plasticidad (I.P.) si se conoce el Límite Líquido (L.L.) del mismo suelo.

#### • Resultados:

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 20: Resultados de índice de plasticidad

MUESTRA	UBICACIÓN	LADO	LÍMITE PLÁSTICO %	ÍNDICE DE PLASTICIDAD
M-01	46+460	Derecho	NP	NP
M-02	47+610	Derecho	19.71	1.85
M-03	48+200	Derecho	20.46	0.11
M-04	49+840	Izquierdo	NP	NP

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

### Figura 29

Ensayo de L.P. – saturación de las muestras



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

### Figura 30

Ensayo de L.P. – formación de varillas de suelo



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

## E) Clasificación según SUCS y AASHTO

### • Descripción:

Según el Anexo N°01 (MTC, 2016, p. 1001), se puede determinar la clasificación de un suelo mediante la metodología SUCS Y AASHTO.

El sistema AASHTO esboza un método para agrupar los suelos basado en mediciones realizadas en laboratorio del tamaño de las partículas, el límite líquido y el índice de plasticidad. Para la evaluación de cada grupo se utiliza un "índice de grupo".

El sistema unificado SUCS se basa en clasificar los suelos en función de su comportamiento como materiales de construcción de ingeniería e identificarlos según sus características o propiedades estructurales y de plasticidad. El grado de grava, arena y finos (fracción que pasa el tamiz N° 200), la distribución cuantitativa granulométrica y las propiedades de plasticidad y compresibilidad sirven de fundamento para la clasificación de los suelos.

### • Resultados:

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 21:** Resultados de tipo de suelo según SUCS y AASHTO

MUESTRA	UBICACIÓN	LADO	CLASIFICACIÓN	
			SUCS	AASHTO
M-01	46+460	Derecho	GP-GM	A-1-a (0)
M-02	47+610	Derecho	SM	A-1-b (0)
M-03	48+200	Derecho	SM	A-1-a (0)
M-04	49+840	Izquierdo	SM	A-1-a (0)

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### 3.4.2. Caracterización mecánica del material de subrasante

Para la caracterización mecánica de la subrasante existente del pavimento, se realizó ensayos de densidad in situ (método de cono de arena), Proctor Modificado y CBR, a fin de determinar la "Capacidad Portante existente de la Subrasante"; a continuación, se realiza una breve descripción de los ensayos realizados para tal efecto:

**Tabla 22:** *Ensayos de laboratorio para la caracterización mecánica*

ENSAYO	NORMA	
DENSIDAD DE CAMPO (CONO DE ARENA)	MTC E 117	NTP 339.143
CORRECCIÓN DEL PESO UNITARIO Y CONTENIDO DE AGUA EN SUELOS QUE CONTIENEN PARTÍCULAS SOBREDIMENSIONADAS	-----	ASTM D 4718
COMPACTACION DE SUELOS (PROCTOR MODIFICADO)	MTC E 115	ASTM D 1557
CBR DE SUELOS (LABORATORIO)	MTC E 132	ASTM D 1883

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

**A) Densidad de campo - cono de arena (MTC E 117)**

• **Descripción:**

Según el (MTC, 2016, p. 126), el método es utilizado para determinar la densidad de suelos compactados que se encuentran en el lugar, para ello, previamente en laboratorio se calibra el aparato de cono de arena y la densidad de la arena, tal como lo señala el Anexo A1 y Anexo A2 y de la norma MTC E117; luego, en campo, se prepara una superficie nivelada donde se realiza el ensayo, se fija el plato base y se excava un orificio de preferencia cilíndrico a una altura que depende del tamaño máximo nominal del material ensayado; posteriormente, se llena el orificio con la arena hasta un punto donde ya no se visualice el descenso del mismo, para finalmente, devolver la arena a su envase y limpiar el lugar ensayado; así mismo, se registra el peso del suelo húmedo excavado, peso de la arena en el cono antes y después del ensayo; teniendo cuidado de evitar pérdidas de humedad.

La norma MTC E117 del Manual de Ensayos de Materiales (2016) en el numeral 7.1.5 también indica que, se puede realizar correcciones de densidad sin considerar el material de mayor tamaño, debiendo de efectuarse a la práctica la norma ASTM D 4718, en caso sea requerido para fines de comparación con el ensayo de laboratorio (Proctor Modificado).

Así mismo, es necesario para esta investigación, poder efectuar comparaciones de las densidades de campo y laboratorio, no solo con el objeto de calcular el grado de compactación a la que se encuentra el suelo con fines de evaluación, sino principalmente, con el objetivo de encontrar un valor de CBR a la densidad natural in situ, que simule una muestra con la misma densidad de campo que al ser ensayada al CBR denote la “capacidad portante existente del suelo ensayado” y este pueda ser comparado con la capacidad portante existente calculado mediante la evaluación deflectométrica que se explicará párrafos más adelante, en consecuencia, para este trabajo de investigación se utilizará la corrección de la densidad de campo según la norma ASTM D 4718.

- **Resultados:**

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de la densidad de campo (cono de arena) sin corrección por sobre tamaño:

**Tabla 23:** *Resultados de la densidad de campo sin corrección por sobre tamaño*

Punto	Lado	Progresiva Km	Densidad húmeda sin corregir (gr/cm <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad de la fracción fina (%)	Densidad seca sin corregir (gr/cm <sup>3</sup> )
1	Derecho	46+050	2.076	4.8	1.981
2	Derecho	46+460	2.118	4.9	2.019
3	Derecho	47+610	2.149	5.1	2.045
4	Izquierdo	47+830	2.133	6.1	2.011
5	Derecho	48+200	2.114	6.4	1.987
6	Derecho	48+740	2.103	6.0	1.983
7	Izquierdo	49+670	2.033	6.1	1.917
8	Izquierdo	49+840	2.115	6.2	1.992

**Figura 31**

*Ensayo de cono de arena – preparación de la superficie*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

**Figura 32**

*Cono de arena – inmersión de la arena en el pozo exploratorio*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

**Figura 33**

*Cono de arena – nivelación de la superficie*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

**B) Corrección del peso unitario en suelos que contienen partículas sobredimensionadas (ASTM D 4718):**

**• Descripción:**

Según la norma (ASTM D4718, 2015), la corrección del peso unitario y contenido de agua es aplicable para suelos que contienen más del 5% en peso de tamaño mayor al utilizado en la prueba ó hasta el 40% retenido acumulado en el tamiz N°4 y hasta el 30% retenido acumulado en el tamiz ¾” según corresponda del tipo de suelo (finos o gruesos respectivamente), para ello, se requiere del peso específico de la grava que tiene que ser calculado en laboratorio.

El objetivo del procedimiento es hacer comparables las densidades del terreno con las de laboratorio y viceversa, para ello, existen dos formas de realizar su corrección, una de ellas es en laboratorio donde la densidad obtenida se ve aumentada por las partículas no utilizadas y la otra forma es en el terreno donde la densidad medida se ve disminuida por la presencia de partículas no consideradas (partículas de gran tamaño).

Para la corrección de densidad para una fracción de una muestra de suelo, la norma indica la siguiente formulación matemática:

$$\gamma_F = \gamma_D G_m \gamma_w P_F / (100 G_m \gamma_w - \gamma_D P_C)$$

Donde:

$\gamma_F$ : Densidad sin incluir las partículas con sobretamaño

$\gamma_D$ : Densidad incluyendo las partículas de sobretamaño

$G_m$ : Peso específico de las partículas de sobretamaño

$\gamma_w$ : Peso unitario del agua

$P_C$ : Porción de partículas más gruesas que el tamaño máximo considerado

$P_F$ : Porción de partículas más finas que el tamaño máximo considerado

- **Resultados:**

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de la densidad de campo (cono de arena) considerando la corrección por sobre tamaño:

**Tabla 24:** Resultados de la densidad de campo con corrección por sobre tamaño

Punto	Lado	Progresiva Km	Peso específico de la grava (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad húmeda corregida (gr/cm <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad de la fracción fina (%)	Densidad seca corregida (gr/cm <sup>3</sup> )
1	Derecho	46+050	2.463	2.035	4.8	1.942
2	Derecho	46+460	2.461	2.056	4.9	1.961
3	Derecho	47+610	2.405	2.106	5.1	2.004
4	Izquierdo	47+830	2.441	2.102	6.1	1.982
5	Derecho	48+200	2.411	2.082	6.4	1.957
6	Derecho	48+740	2.45	2.058	6.0	1.941
7	Izquierdo	49+670	2.425	2.001	6.1	1.886
8	Izquierdo	49+840	2.440	2.047	6.2	1.928

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

**Figura 34**

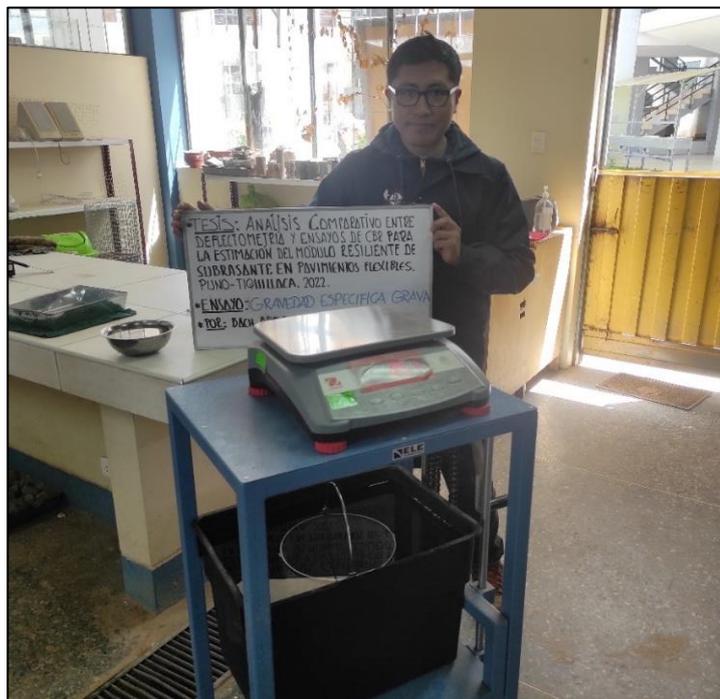
*Peso específico de la grava – inmersión de la grava en la canastilla*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

**Figura 35**

*Peso específico de la grava – registro de peso de grava inmerso en agua*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### C) Compactación de suelos – Proctor modificado (MTC E 115)

#### • Descripción:

Según el (MTC, 2016, p. 102), la prueba sólo se aplica a los suelos que tienen el 30% o menos en peso de sus partículas contenidas en el tamiz de 19,0 mm (3/4"), y su objetivo es identificar la relación entre el contenido de agua y el peso unitario seco de los suelos (curva de compactación). Se ofrecen tres enfoques distintos. En las especificaciones del material a ensayar debe especificarse el procedimiento a emplear. La opción se realizará en función de la gradación del material si no se indica la técnica; en nuestra situación, tenemos:

**Tabla 25:** Cálculo del método C para el ensayo de proctor modificado

RUTA	MUESTRA	PROGRESIVA KM	% RETENIDO ACUMULADO TAMIZ 3/4"	% RETENIDO ACUMULADO TAMIZ 3/8"	% RETENIDO ACUMULADO TAMIZ N°4	% PASANTE TAMIZ N°4	METODO ELEGIDO
	1	46+460	28.7	50.0	62.0	38.0	C
PE-	2	47+610	13.1	28.5	40.5	59.5	C
34U	3	48+200	13.6	30.1	42.8	57.2	C
	4	49+000	16.5	30.2	43.2	56.8	C

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

El procedimiento del ensayo es el siguiente:

- Se revisa que todos los equipos y herramientas estén en buenas condiciones para el trabajo, se realizan los ajustes y reparaciones necesarias.
- Para el método de preparación seca se deja secar la muestra al aire, luego se separa material representativo para cinco especímenes (aprox. 30 kg) para el método C, luego, se pesa la muestra en la balanza con aproximación a 01 gramo.
- Se le añade agua al suelo, como mínimo dos contenidos de agua queden en el lado seco y húmedo del óptimo para definir exactamente la curva de compactación del peso seco unitario, los rangos de contenidos de agua no deben exceder de 4%, es

decir, dependiendo del tipo de suelo se puede considerar 2%, 4%, 6%, 8% y 10% respectivamente, cuya variación dependerá del criterio de quien realiza el ensayo.

- Se registra el peso del molde, base y collar.
- Para el método C se procede a la compactación en 05 capas de igual espesor a 56 golpes por cada capa con una frecuencia de 25 golpes por minuto.
- Se retira el collar y se procede a enrasar a nivel del molde para proceder a registrar el peso del molde, base, collar y muestra húmeda.
- Se procede a retirar la muestra compactada cortando axialmente por el centro del espécimen compactado removiendo 500gr del material de los lados cortados para obtener el contenido de humedad.
- Se realiza el mismo procedimiento para los demás especímenes y así obtener la curva de compactación de Contenido de Humedad vs Peso Unitario Seco.

• **Resultados:**

Los resultados de las relaciones contenido de humedad y densidad seca máxima se muestran en la siguiente Tabla.

**Tabla 26:** *Resultados de optimo contenido de humedad y máxima densidad seca*

MUESTRA	UBICACIÓN	LADO	CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO (%)	DENSIDAD MÁXIMA SECA (GR/CM3)
M-01	46+460	Derecho	8.20	2.115
M-02	47+610	Derecho	8.40	2.106
M-03	48+200	Derecho	8.45	2.088
M-04	49+840	Izquierdo	8.20	2.105

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

**Figura 36**

*Ensayo de proctor modificado – compactación de la muestra*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

**Figura 37**

*Ensayo de proctor modificado – registro de peso de la muestra*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

#### **D) CBR de suelos - laboratorio (MTC E 132)**

##### **• Descripción:**

Según el (MTC, 2016, p. 230), el objetivo del ensayo es evaluar la resistencia potencial de subrasante, el procedimiento del ensayo es el siguiente:



- Se prepara una muestra representativa de acuerdo a las relaciones de peso unitario-humedad en los suelos, con equipo modificado se selecciona el material que pase por el tamiz 19,1 mm (3/4").
- Se determina el contenido de humedad del suelo, se le añade la cantidad de agua que falte para alcanzar la humedad fijada para el ensayo.
- Se pesa el molde, se coloca el collar y el disco espaciador y sobre este un disco de papel filtro grueso del mismo diámetro.
- Una vez preparada la muestra, se compacta con diferentes energías de compactación en 05 capas por espécimen, normalmente, se usan la energía del Proctor Estándar, la del Proctor Modificado y una Energía Inferior al Proctor Estándar dando 56, 25 y 10 golpes por capa.
- Después de la compactación, se quita el collar y se enrasa el espécimen por medio de un enrasador.
- Se desmonta el molde y se vuelve a montar invertido, sin disco espaciador, colocando un papel filtro entre el molde y la base y se pesa.
- Se sumerge la muestra por 04 días registrando todos los días la expansión del mismo, posterior a ese tiempo se deja escurrir durante 15min. para proceder al ensayo de penetración.
- Se ensaya la muestra a la penetración donde se considera una sobrecarga para producir una intensidad de carga igual al peso del pavimento, además de ello, se aplica una carga sobre el pistón de penetración, se anota las lecturas de carga para diferentes penetraciones a una velocidad de 1.27mm por min.
- El espécimen se saca del molde y se rompe por la mitad tomando del centro de la probeta una muestra de suelo después del ensayo de penetración para determinar la humedad.

• **Resultados:**

Los resultados de valor de CBR para las 04 muestras se muestran en la siguiente Tabla.

**Tabla 27:** Resultado de CBR de 4 muestras ensayadas

MUESTRA	UBICACIÓN	LADO	C.B.R. al 100% de la M.D.S. a 0.1"	C.B.R. al 95% de la M.D.S. a 0.1"	C.B.R. al 100% de la M.D.S. a 0.2"	C.B.R. al 95% de la M.D.S. a 0.2"
M-01	46+460	Derecho	33.7	17.2	39.8	21.1
M-02	47+610	Derecho	19.4	7.5	25.8	8.3
M-03	48+200	Derecho	28.5	11.2	36.1	14.1
M-04	49+840	Izquierdo	27.0	17.6	33.2	20.5

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

**Figura 38**

Ensayo de CBR – compactación de la muestra



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

### Figura 39

*Ensayo de CBR – inmersión de la muestra*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### Figura 40

*Ensayo de CBR – penetración de la muestra*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo



### **3.5. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE MEDIANTE CBR DE LABORATORIO**

#### **3.5.1. Cálculo del CBR a la densidad natural**

Antes de correlacionar el valor de CBR de un suelo in situ con el módulo de resiliencia o Módulo Elástico existente de la carretera al momento de la evaluación se debe obtener el valor de CBR a la densidad natural obtenida mediante el cono de arena.

Primeramente, se tendrá que tener los datos del Proctor modificado y el CBR de laboratorio para poder graficar las curvas de “CBR a 0.1” y 0.2” vs la Densidad Seca ( $\text{gr/cm}^3$ )”.

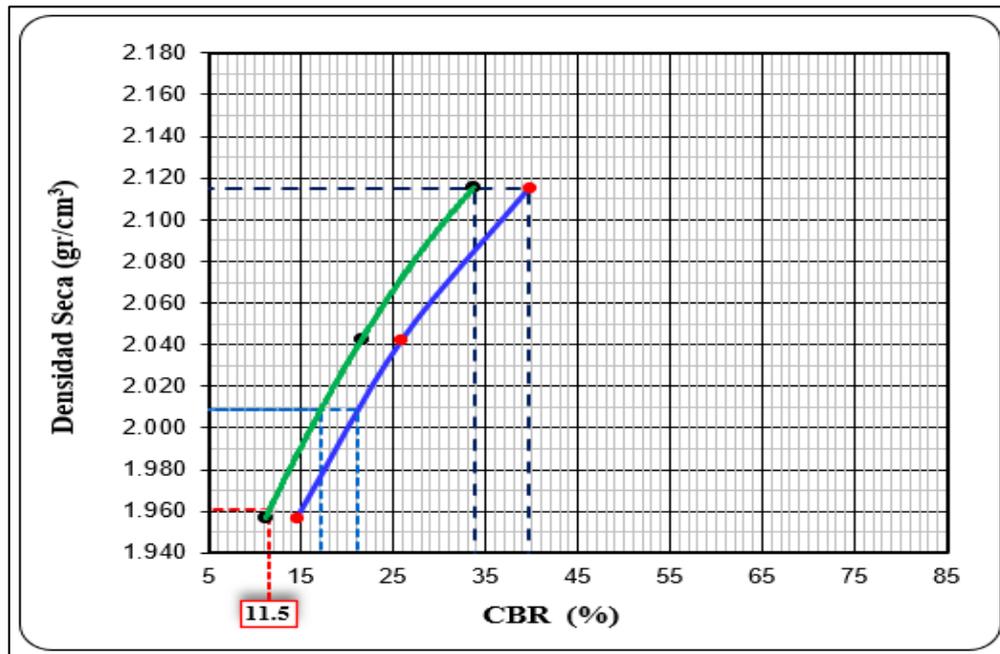
Posteriormente, se traza una línea horizontal desde la densidad seca natural encontrada por el método de cono de arena, tal que, su intersección corte a las curvas de CBR a 0.1” y 0.2”, a partir de ahí, se traza una línea vertical que intercepte los correspondientes valores de CBR, para nuestro caso se considerará el valor de CBR a la densidad natural correspondiente a 0.1”.

Finalmente, el CBR a 0.1” a la densidad natural serán reportados para su correspondiente correlación con el Módulo de resiliencia.

A continuación, a manera de ejemplo se presenta el cálculo de CBR a la densidad natural de la muestra 01:

**Figura 41**

*Cálculo de CBR a la densidad natural de la muestra 01*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### 3.5.2. Cálculo del módulo resiliente mediante correlación de CBR

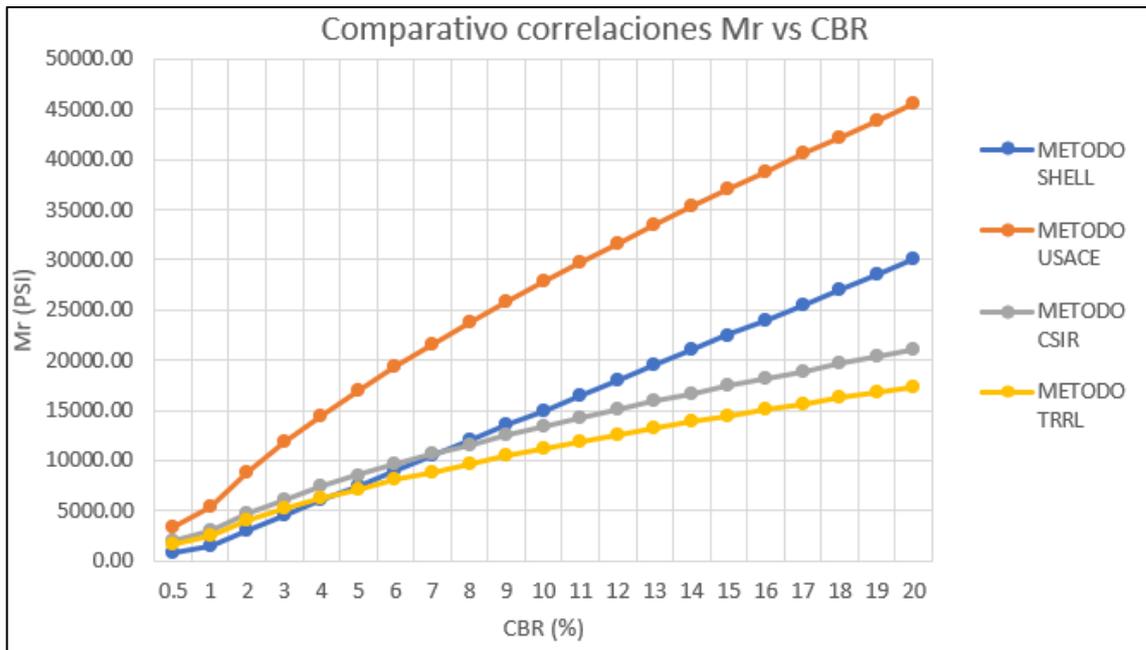
El uso de ecuación de correlación para determinar el módulo resiliente a partir de CBR se justifica en la recomendación de la figura 4.1. Correlaciones Típicas entre las Clasificaciones y Propiedades de los Suelos con el Módulo de Resiliente-Capítulo IV.

El manual de Carreteras (MTC, 2014, p. 36): Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, por ser de aplicabilidad general en el diseño y evaluación de pavimentos en el Perú.

Es importante señalar que la guía AASHTO basado en el diseño empírico mecanicista de pavimentos (MEPDG) recomienda dicha fórmula sin perjuicio del tipo de suelo (Ver Figura 43), la misma que hasta la actualidad ha sido la más utilizada por su carácter conservador a comparación de las demás correlaciones que según la literatura, tal como lo señala (Dione et al., 2014) son muy limitadas, de hecho, la mayoría de estas relaciones se aplican a suelos finos con valores muy bajos de CBR.

**Figura 42**

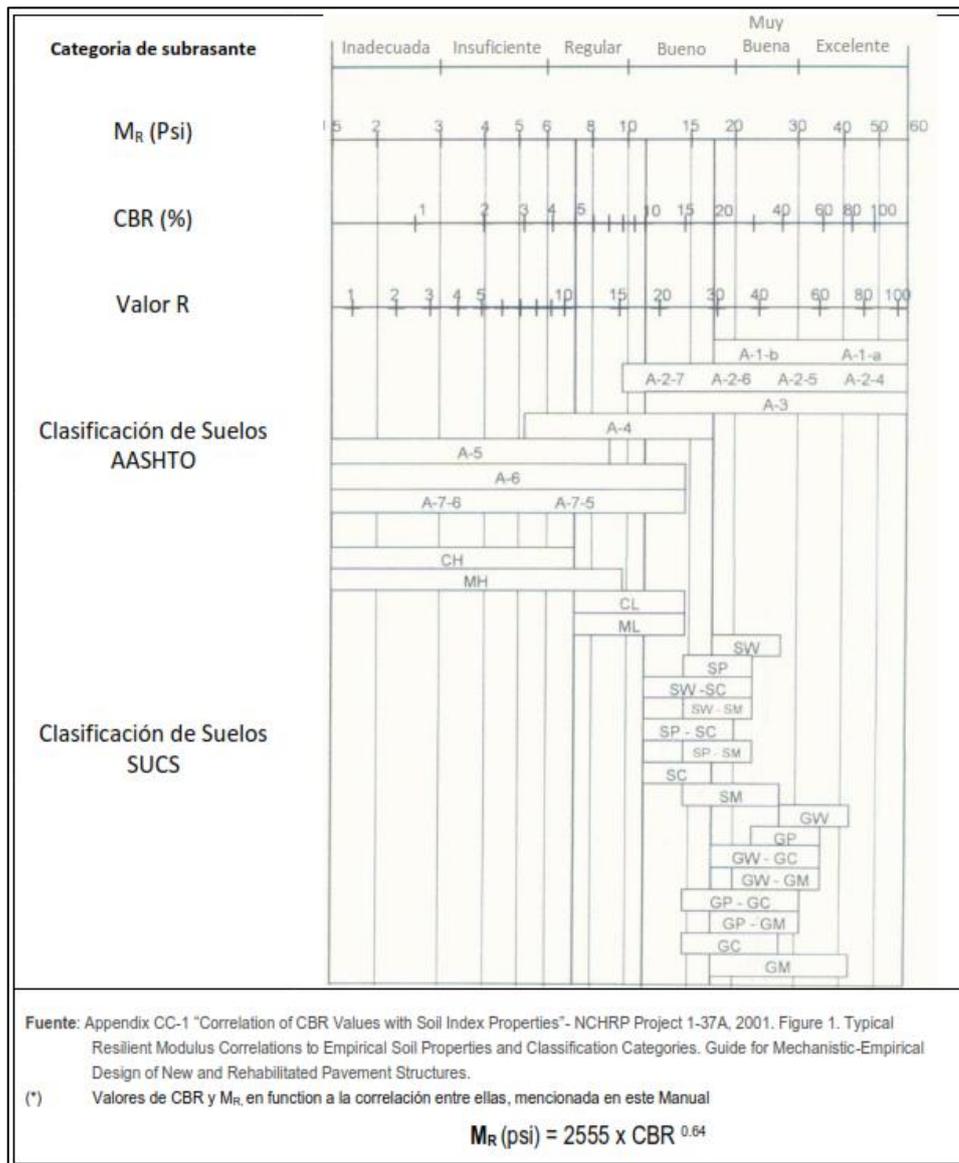
Comparación entre el módulo resiliente – CBR, mecánico empírico



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Del gráfico anterior se observa que para los métodos Shell, CSIR Y TRRL en un rango del 0.5 a 5% de CBR los valores de Mr son similares (suelos finos), por otro lado, los métodos Shell y CSIR para valores mayores a 5% tienden a sobreestimar el valor de Mr a comparación del método TRRL adoptada por la AASHTO, mientras que el método USACE tiene una variabilidad muy dispersa respecto a los demás métodos, lo que corrobora lo indicado en la literatura.

**Figura 43**  
*Módulo resiliente mediante correlación de CBR*



*Fuente:* (MTC, 2014, p. 36)

En la zona de estudio se ha encontrado en la subrasante los tipos de suelo GP-GM y SM cuyos valores de CBR oscilan entre 7.5 a 17.6% según los ensayos de laboratorio, en consecuencia, por la variabilidad del tipo de suelo, recomendación de la norma peruana y la guía AASHTO se considera la ecuación de correlación:

$$M_r = 2555 * (\text{CBR})^{0.64}$$

Donde:

$M_r$ : Módulo de resiliencia en PSI



*CBR*: Valor de capacidad de soporte en %

En ese contexto, para nuestra investigación se considerará dicha fórmula por ser ampliamente utilizada por su confiabilidad.

A continuación, se presenta el cálculo de  $M_r$  de la muestra 01:

- CBR de laboratorio a la densidad natural de la M-01=11.5%
- $M_r = 2555 * (11.5)^{0.64}$
- $M_r=12196.6$  PSI=857.5kg/cm<sup>2</sup>

### **3.6. DETERMINACIÓN DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN**

La medición de las lecturas deflectométricas se realizó siguiendo los procedimientos establecidos en la norma “MTC E 1002- Medida de la deflexión de un pavimento empleando la Viga Benkelman” del (MTC, 2016, p. 845).

#### **3.6.1. Materiales e instrumentos**

- Viga Benkelman de doble brazo con dial de precisión de 0.01 mm y relación de brazos 1:2.44 calibrada, de la marca ELE International, modelo 47-1460, Serie H050710 de procedencia americana.

**Figura 44**  
*Calibración de la viga benkelman*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

**Figura 45**  
*Certificado de calibración de la viga benkelman*

Valor		Lectura del instrumento			Promedio	Relación de brazo	Incertidumbre mm
Nominal		L1	L2	L3	$(L1+L2+L3)/3$		
mm	mm	mm	mm	mm	mm		
4	1,52	1,52	1,52	1,52	2,63	0,02	
6	2,51	2,50	2,49	2,50	2,40	0,02	
8	3,49	3,47	3,48	3,48	2,30	0,02	

**Relación Promedio Brazo 1**    **2,44**

**Observaciones**

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación de "CALIBRADO"
- La incertidumbre de medición se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar de la medición por el factor de cobertura  $k=2$  para una distribución normal de aproximadamente 95 %.

**Fin del documento.**

Sello

Jefe del laboratorio de calibración

**CEM INDUSTRIAL**

*Jesús Quinto C.*

**JESUS QUINTO C.**

JEFE DE LABORATORIO

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

- Camión para ensayo con peso de eje trasero igual a 8.2 Tn., igualmente distribuidos en sus ruedas duales, llantas de 10"x20"; 12 lonas e infladas a 5.6 kg/cm<sup>2</sup> (80 PSI), distancia entre puntos medios de la banda de rodamiento igual a 32 cm.

**Figura 46**

*Camión de tipo C2 para el ensayo con la viga benkelman*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

- Termómetro digital con escala de de -50° a 300°C para la medición de la temperatura del pavimento.

**Figura 47**

*Medición de la temperatura del pavimento*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

- Cronómetro.
- Cinta métrica de Acero pequeña de 5m y flexómetro de 25m.
- Manómetro para medición de presión de neumáticos.
- Silbato utilizado para la coordinación en la medición de los puntos con el conductor del camión.
- Martillo y clavos de acero.
- Yeso o tizas para las marcas en el pavimento donde se realizarán las mediciones de las deflexiones.
- Formatos de toma de lecturas en campo.
- Equipos de protección personal y colectiva (incluye casco, zapatos de seguridad, chalecos fluorescentes, conos de seguridad, entre otros).

#### **Figura 48**

*Equipos de protección personal (EPPs)*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

**Figura 49**  
*Señalización mediante conos de seguridad*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### 3.6.2. Personal

01 conductor del camión para ensayo, 01 ayudante, 02 personas para la manipulación de la Viga Benkelman y registro de las lecturas deflectométricas y 02 vigías a la entrada y salida de la calzada para seguridad.

**Figura 50**  
*Personal de trabajo para el ensayo de la viga benkelman*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### 3.6.3. Procedimiento en campo

- Se realizó el cargado y peso del camión de ensayo del eje trasero en la balanza, siendo este de 18,000 lb (8,200 kg), el mismo que fue controlado por bolsas de cemento de peso de 42.5 kg cada uno; además de la medición de la presión de los neumáticos en 80 PSI; la distancia entre los puntos medios de la banda de rodamiento de ambas llantas igual a 32 cm.
- Posteriormente los puntos del pavimento fueron marcados con una línea transversal al sentido del carril a cada 25m de forma alternada en la calzada a una distancia del borde de acuerdo a la norma MTC E 1002, esta fue establecida en 0.90m, de acuerdo a la tabla 7, puesto que el ancho de carril promedio fue de 3.70m.

#### Figura 51

*Distancia desde el borde del pavimento - 0.90m*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

- Previo a las mediciones de deflexiones, se procedió a adherir a la parte trasera del camión cargado una varilla tal que su proyección vertical sea marcada en la viga colocada, de tal manera que, el extremo del brazo móvil se encuentre en medio de

la rueda dual derecha, posteriormente, con la finalidad de obtener el cuenco de deflexiones, se efectuó, a partir de la primera, sucesivas marcas a distancias elegidas a las cuales se midió deflexiones adicionales. Para la metodología de análisis se requiere de por lo menos tres lecturas, pero se pueden obtener más con fines de verificación, para nuestro caso se estableció mediciones en cada punto a distancias  $D_0$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{75}$ ,  $D_{130}$  y  $D_{m\acute{a}x}$ .

### **Figura 52**

*Marcación de puntos sobre la viga benkelman*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

- Luego, una vez estacionados el camión de ensayo y la Viga Benkelman en el punto de prueba se liberó los seguros de los brazos y se procedió a ajustar la base de la viga de la parte trasera, tal que los brazos queden en contacto con los diales, se puso el dial en cero y se activó el vibrador para iniciar con la toma de lecturas.

### Figura 53

*Ajuste perpendicular de la viga benkelman*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### Figura 54

*Colocación de la viga sobre el punto de ensayo*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

- El operador ayudante avisó al conductor para que se desplace lentamente, de esa manera se procedió a registrar las lecturas conforme la varilla vertical adosada vaya coincidiendo con la primera y demás marcas adicionales hasta el último

punto de referencia donde el camión se aleja lo suficiente, de tal manera que la deflexión sea cero y el indicador del dial ya no tenga movimiento.

**Figura 55**

*Registro de datos deflectométricos*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

- 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.

**Figura 56**

*Ajuste Perpendicular de la viga benkelman*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### 3.6.4. Cálculo de las deflexiones corregidas

- A. En primera instancia, se registra en campo las lecturas de deflexión tanto para el carril izquierdo y derecho a distancias (L0, L25, L50, L75, L130 y Lmáx), tal como se muestra a continuación:

**Figura 57**

*Formato para la recopilación de mediciones de campo*

		ENSAYO ANALISIS DEFLECTOMETRICO VIGA BENKELMAN ASTM D 4695 - MTC E1002		CODIGO:							
PROYECTO		: TESTIS		RELACION DE BRAZO : 1:2.44							
UBICACIÓN		: RUTA PE-34U		CARGA POR EJE : 8.2Tm							
ESTRUCTURA		: T.S.D		UNIDAD DE LECTURA : 1/100 mm/mm							
PROGRESIVA		: KM 46+000 - KM 47+450		FECHA : NOV-2022							
ESPESOR PAVIMENTO											
ITEM	PROGRESIVA	LADO	LECTURA EN DIAL						TEMPERATURA		OBSERVACIONES
			L0	L25	L50	L75	L130	Lmax	AMB. (°C)	PAV. (°C)	
1	46+000	D	0	2	8	10	11	14	19	31.2	-
2	46+050	D	0	5	12	15	18	24	"	"	-
3	46+100	D	0	6	12	15	22	32	"	"	-
4	46+150	D	0	10	14	22	33	34	"	"	-
5	46+200	D	0	12	16	18	20	22	"	"	-
6	46+250	D	0	6	12	13	14	16	"	"	-
7	46+300	D	0	9	12	18	23	30	"	"	-
8	46+350	D	0	10	11	13	15	19	"	"	-
9	46+400	D	0	4	7	9	11	13	"	"	-
10	46+450	D	0	9	18	21	25	27	20.6	32.8	-
11	46+500	D	0	7	10	14	14	20	"	"	-
12	46+550	D	0	9	15	19	24	29	"	"	-
13	46+600	D	0	7	12	17	21	23	"	32.3	-
14	46+650	D	0	7	14	19	25	30	"	"	-
15	46+700	D	0	8	12	16	20	25	"	"	-
16	46+750	D	0	6	11	16	19	23	"	"	-
17	46+800	D	0	9	15	22	23	30	"	"	-
18	46+850	D	0	8	15	20	23	25	21.3	33.5	-
19	46+900	D	0	8	13	19	28	31	"	"	-
20	46+950	D	0	20	25	31	36	40	"	"	-
21	47+000	D	0	10	20	24	28	30	"	"	-
22	47+050	D	0	10	18	24	33	39	"	33.5	-
23	47+100	D	0	3	9	15	18	20	"	"	-
24	47+150	D	0	13	20	29	35	39	"	"	-
25	47+200	D	0	6	4	17	23	31	19	31.2	-
26	47+250	D	0	10	17	22	26	28	"	"	-
27	47+300	D	0	9	15	21	25	28	"	"	-
28	47+350	D	0	5	9	12	22	25	"	"	-
29	47+400	D	0	13	20	26	32	40	"	"	-
30	47+450	D	0	5	10	14	15	17	"	"	-

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

### Figura 58

Recopilación de mediciones en campo





**Tabla 28:** Lecturas de dial de campo para la progresiva km 46+000

PROGRESIV A	LECTURA EN EL DIAL EN CAMPO (0.01 mm)						ESPESO R	TEMP. PAV.
(KM)	R0= 0	R1=25cm	R2=50cm	R3=75cm	R4=130cm	Rf>500cm	e (cm)	°C
46+000	0	2	8	10	11	14	2.5	31.2

**Fuente:** Elaborado por el equipo de trabajo

$$D_0 (D_{\text{máx}}) = (14 - 0) * 2.44 = 34.16 * 10^{-2} \text{mm}$$

- Para encontrar la deflexión a una determinada distancia:

$$D_x = (L_f - L_x) * K$$

Donde:

$D_x$ : Deflexión a una determinada distancia.

$L_x$ : Lectura a una determinada distancia.

$L_f$ : Lectura final de la estación.

$K$ : Constante de la viga (relación de brazos 1:2.44).

Para nuestro ejemplo se tiene:

$$D_{25} = (14 - 2) * 2.44 = 29.28 * 10^{-2} \text{mm}$$

$$D_{50} = (14 - 8) * 2.44 = 14.64 * 10^{-2} \text{mm}$$

$$D_{75} = (14 - 10) * 2.44 = 9.76 * 10^{-2} \text{mm}$$

$$D_{130} = (14 - 11) * 2.44 = 7.32 * 10^{-2} \text{mm}$$

- C. Una vez calculada las deflexiones, se procede a corregir por el factor de estacionalidad (temperatura) de acuerdo a la siguiente formula:

$$D_c = \frac{D}{(1 * 10^{-3} * \frac{1}{\text{cm}^\circ\text{C}} * e * (T - 20^\circ\text{C})) + 1}$$

Donde:

$D_c$ : Deflexión corregida por temperatura.

$D$ : Deflexión calculada.

$e$ : Espesor teórico de la carpeta asfáltica en cm.

$T$ : Temperatura del pavimento en °C.

Para nuestro ejemplo se tiene:

$$Dc0 = \frac{34.16}{(1 * 10^{-3} * \frac{1}{cm^{\circ}C} * 2.5 * (31.2 - 20^{\circ}C)) + 1} = 33.23 * 10^{-2} mm$$

$$Dc25 = 28.48 * 10^{-2} mm$$

$$Dc50 = 14.24 * 10^{-2} mm$$

$$Dc75 = 9.49 * 10^{-2} mm$$

$$Dc130 = 7.12 * 10^{-2} mm$$

Es importante señalar que, la corrección de la deflexión por temperatura es importante, sobre todo cuando se realiza las mediciones en un tiempo donde la temperatura es muy alta o muy baja, ya que esta puede incidir en los resultados.

### 3.6.5. Cálculo de radio de curvatura

Cuando las capas elásticas se flexionan bajo la acción de cargas, experimentan una deformación lineal por tracción que se mide por el radio de curvatura, la cual considera las unidades y la distancia entre el punto central y el segundo punto de medición.

El radio de curvatura según el Manual de Ensayo de Materiales (MTC, 2016, p. 849), puede ser calculado por la fórmula empírica:

$$R = \frac{3125}{(D0 - D25)}$$

Donde:

$R$ : Radio de curvatura (m).

$D0$ : Deflexión máxima recuperable en el eje de carga (1/100mm).

$D25$ : Deflexión a 25 cm del eje vertical de carga (1/100mm).

Para la progresiva del km 46+000 se tiene:

$$R = \frac{3125}{(33.23 - 28.48)} = 658.30$$

### 3.6.6. Cálculo de deflexión promedio o media

El cálculo de la deflexión promedio, se determina de la siguiente manera (La presente ecuación se mencionó en el ítem 2.2.7.2 de la sección E. del capítulo II):

$$Dm = \sum_{i=1}^n Di$$

Donde:

$Dm$ : Deflexión media de  $n$  deflexiones.

$Di$ : Deflexiones desde  $i=1$  a  $i=n$

$n$ : Número total de medidas.

### 3.6.7. Cálculo de la desviación estándar

El cálculo de la desviación estándar, se determina de la siguiente manera (La presente ecuación se mencionó en el ítem 2.2.2.7 de la sección E. del capítulo II):

$$\text{Para "n"} \leq 30 \text{ entonces } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Di - Dm)^2}{n-1}}$$

Donde:

$\sigma$ : Desviación estándar.

$Di$ : Deflexiones desde  $i=1$  a  $i=n$ .

$n$ : Número total de medidas.

$Dm$ : Deflexión media de  $n$  deflexiones.

### 3.6.8. Cálculo del coeficiente de variación

(La ecuación presente ecuación se mencionó en el ítem 2.2.2.7 de la sección E)

$$C.V. = \frac{\sigma}{Dm} * 100$$

Donde:

$\sigma$ : Desviación estándar.

$Dm$ : Deflexión media.

### 3.6.9. Cálculo de la deflexión característica

La deflexión característica es una medida estadística utilizada para caracterizar de forma representativa la magnitud de la deformación de la estructura del pavimento. Para realizar esta evaluación es importante determinar los parámetros estadísticos y disponer de una base de datos de las deflexiones máximas de los tramos.

Se define con la siguiente expresión empírica:

$$Dc = Dm + t * \sigma$$

Donde:

$D_c$  = Deflexión característica.

$D_m$  = Deflexión promedio de los valores individuales de  $D_0$  corregidos.

$\sigma$  = Desviación estándar.

$t$  = Coeficiente que representa al porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la deflexión característica  $D_c$ .

Según el cuadro 12.22 del Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” del (MTC, 2014, p. 172) para carreteras de segunda y tercera clase se considerará con una confiabilidad de 90%:

$$D_c = D_m + 1.282 * \sigma$$

De la aplicación de las ecuaciones precedentes, para el sector homogéneo N°01, km 46+000 al km 46+750, se tiene lo siguiente:

**Tabla 29:** Deflexiones corregidas y radio característico del sector homogéneo N°01

CARRIL	PROGRESIVA (KM)	D0 (Dmax.)	D25	D50	D75	D130	Rc (m)
Derecho	46+000	33	28	14	9	7	658
Izquierdo	46+025	64	43	36	14	5	146
Derecho	46+050	57	45	28	21	14	263
Izquierdo	46+075	102	64	50	40	24	82
Derecho	46+100	76	62	47	40	24	219
Izquierdo	46+125	74	40	31	24	12	94
Derecho	46+150	81	57	47	28	2	132
Izquierdo	46+175	59	40	31	21	9	165
Derecho	46+200	52	24	14	9	5	110
Izquierdo	46+225	52	28	17	9	5	132
Derecho	46+250	38	24	9	7	5	219
Izquierdo	46+275	45	31	21	17	7	219
Derecho	46+300	71	50	43	28	17	146
Izquierdo	46+325	47	38	26	19	2	329
Derecho	46+350	45	21	19	14	9	132
Izquierdo	46+375	59	36	26	21	9	132
Derecho	46+400	31	21	14	9	5	329
Izquierdo	46+425	57	36	21	24	7	146
Derecho	46+450	64	43	21	14	5	147
Izquierdo	46+475	57	47	31	19	9	329
Derecho	46+500	47	31	24	14	7	189
Izquierdo	46+525	69	52	38	26	12	188
Derecho	46+550	69	47	33	24	12	147



Izquierdo	46+575	69	38	26	17	9	101
Derecho	46+600	54	38	26	14	5	189
Izquierdo	46+625	71	50	28	14	7	146
Derecho	46+650	71	54	38	31	12	189
Izquierdo	46+675	62	36	21	9	5	120
Derecho	46+700	59	40	31	21	12	165
Izquierdo	46+725	62	45	33	17	7	188
Derecho	46+750	54	40	28	17	9	220
<b>D. Máximo:</b>		<b>102</b>					
<b>D. Mínimo:</b>		<b>31</b>					
<b>D. Promedio:</b>		<b>60</b>					
<b>Desv. Estándar:</b>		<b>14</b>					
<b>Coef. Variación:</b>		<b>24%</b>					
<b>D. característica:</b>		<b>78</b>					

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

### 3.6.10. Cálculo de la deflexión admisible

Según Para el presente estudio se ha adoptado la relación propuesta por CONREVIAl (Estudio de Rehabilitación de Carreteras del País. MTC-Perú), asimismo, según el (MTC, 2014, p. 172) las deformaciones se contrastan con el valor límite admitido, que es la deformación tolerable que garantiza un comportamiento aceptable del pavimento en relación con el tráfico que debe soportarlo.

$$D_{adm} = (1.15/N)^{0.25}$$

Donde:

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

$N$  = Número de repeticiones de ejes equivalentes en millones

El número de repeticiones de ejes equivalentes será el considerado en el diseño según estudio de tráfico de la carretera para el año 2023 se tiene:

Según el estudio de tráfico del estudio de pre inversión elaborado por el Consultor en año 2019, el ESAL proyectado al periodo de diseño de 05 años de la carretera Puno – Tiquillaca es  $N=174151$ , entonces se tiene:

$$D_{adm} = \left( \frac{1.15}{\frac{174151}{1000000}} \right)^{0.25}$$

$$D_{adm} = 160.30 * 10^{-2} \text{ mm}$$

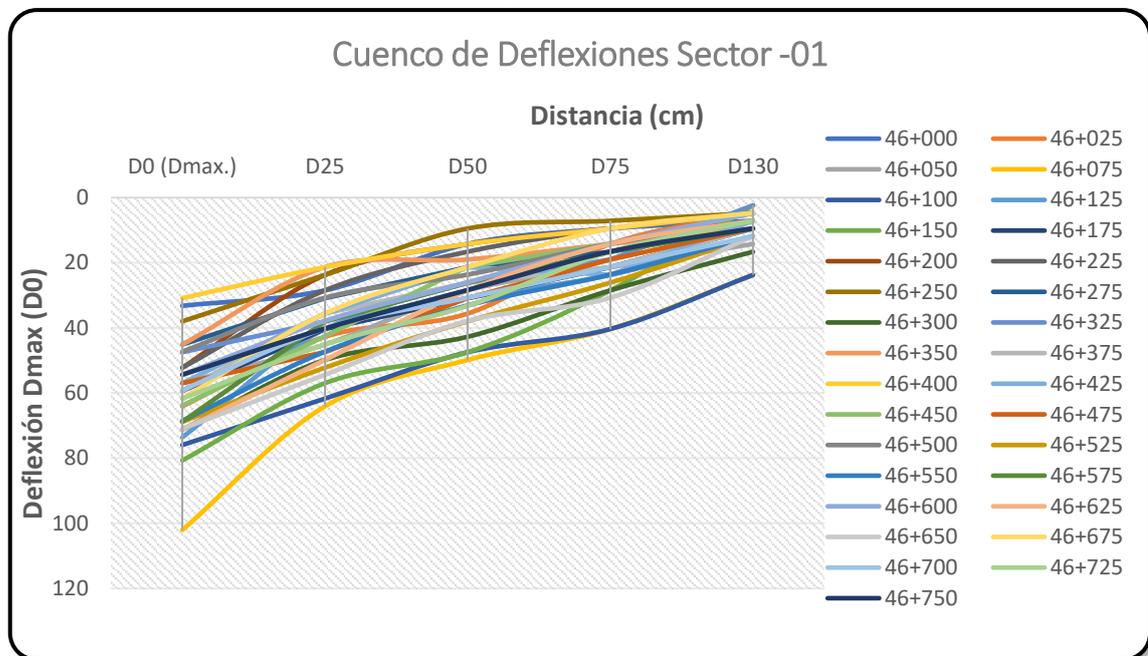
### 3.6.11. Gráfico del cuenco de deflexiones

Una vez calculadas las deflexiones corregidas se procede a graficar el cuenco de deflexiones con la ayuda del programa automatizado EXCEL, a fin de determinar el estado del pavimento y subrasante evaluado para cada progresiva.

A continuación, se muestra el cuenco de deflexiones del sector homogéneo N°01 del km 46+000 al km 46+750 de la ruta PE34U:

**Figura 59**

*Cuenca de deflexiones del sector homogéneo N°01*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

Del gráfico anterior se observa que, para el valor de D0 (Dmáx) la deflexión máxima es de  $102.06 * 10^{-2} \text{ mm}$ , la deflexión mínima es de  $33.23 * 10^{-2} \text{ mm}$  y la deflexión promedio es de  $68.24 * 10^{-2} \text{ mm}$ .

Según la forma del cuenco de deflexiones, el sector homogéneo N°01 evaluado presenta una interacción pavimento – subrasante regular a buena.

El análisis y resultados de los demás sectores homogéneos se presenta en el capítulo de resultados y discusiones.

### **3.7. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE MEDIANTE EL ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO**

#### **3.7.1. Cálculo del módulo resiliente por el método de Hogg simplificado**

El método de Hogg Simplificado es un método sencillo y dinámico para ser aplicado en obra, se realiza el procedimiento con la finalidad de encontrar la capacidad de soporte de los suelos a través del Módulo Elástico y/o Resiliencia del suelo de fundación, así como también el cálculo del CBR de manera indirecta, todo ello tomando como referencia el Método de Hogg descrito en el capítulo de marco teórico.

Este procedimiento se describe en el documento titulado “Determinación del módulo resiliente del suelo de fundación mediante el método mecanicístico-empiricista Método de Hogg Simplificado” presentado por el Ing. (Del Aguila Rodriguez, 2007, p. 4), en el XIV Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto en la Habana, Cuba.

Es importante señalar que, como ya se indicó en el marco teórico, el Método de Hogg emplea tres casos diferentes para el cálculo del módulo de elasticidad; sin embargo, según (Del Aguila Rodriguez, 2007, p. 4), se seleccionó el caso II para el análisis de los datos de deflexión porque ha sido ampliamente utilizado en el Perú y ha producido consistentemente resultados que se correlacionan con las condiciones específicas del suelo en el campo; también destaca el hecho de que la elección del caso II es consistente con los hallazgos del proyecto de investigación a largo plazo sobre el desempeño de pavimentos que se ha llevado a cabo en los Estados Unidos desde 1987 (Long Term Pavement Performance); de acuerdo a dicha experiencia, se ha observado una alta conexión entre éstos y los módulos de la subrasante, y se ha descubierto que el caso II del modelo de Hogg es el que ofrece resultados razonablemente estables para una variedad de tipos de pavimento y ubicaciones, habiéndose encontrado una alta relación de estos con los módulos de subrasante que fueron calculados por retro cálculo con el software

MODCOMP4, el cual permite la caracterización elástica no – lineal de los suelos y materiales del pavimento.

En consecuencia, para esta investigación, se considerará los cálculos con los coeficientes del CASO II del Modelo De Hogg.

A continuación, se presenta el procedimiento de cálculo del Módulo resiliente e indirectamente el valor de CBR mediante el Método de Hogg Simplificado, para el cual, se tomará como ejemplo la progresiva del km 46+000 del carril derecho:

- a) Como primer paso, de las deflexiones ya calculadas en el acápite anterior, se selecciona el valor de la deflexión máxima “D0 (Dmáx)” y una deflexión adicional “Dr” correspondiente a la distancia radial “R”, tal que la relación de Dr/D0 sea aproximadamente 0.5.

$$D0=33.23 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$Dr=14.24 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$R=50$$

- b) Se calcula la relación “D0/Dr”.

$$\frac{D0}{Dr} = \frac{0.3323}{0.1424} = 2.33$$

- c) Se calcula el valor del Factor de Longitud de Curva “R50” empleando la Ecuación B de la Tabla 9, la relación “D0/Dr” y los coeficientes de la Tabla 10.

$$R50 = R * \frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} - B}{\left(\frac{1}{\alpha} * \left(\frac{D0}{Dr} - 1\right)\right)^{\frac{1}{\beta}} - B}$$
$$R50 = 50 * \frac{(2.629)^{0.548} - 0}{\left(2.629 * \left(\frac{33.23}{14.24} - 1\right)\right)^{0.548} - 0} = 42.7$$

- d) Se calcula el producto “D0 \* R50”.

$$D0 * R50 = 33.23 * 42.7 = 1419.15$$

- e) Se calcula el módulo resiliente mediante la Ecuación siguiente de la Ítem 2.2.8 del Capítulo de II.

$$Esg = 1091314.96 * (D0 * R50)^{-0.939}$$

$$Esg = 1091314.96 * (1419.15)^{-0.939}$$

$$Esg = Mr = 1197.3 \frac{kg}{cm^2}$$

- f) Se calcula el valor de CBR del suelo indirectamente considerando la fórmula de la Figura 4.1. Correlaciones típicas entre las clasificaciones y propiedades de los suelos con el módulo resiliente del Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos (2014) descrita a continuación:

$$Mr = 2555 * (CBR)^{0.64}$$

Donde:

Mr: Módulo de resiliencia en PSI

CBR: Valor de capacidad de soporte en %

Entonces:

$$CBR = \left( \frac{Mr * 14.2233}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}}$$

Donde:

Mr: Módulo de resiliencia en kg/cm<sup>2</sup>

CBR: Valor de capacidad de soporte en %

Para nuestro ejemplo:

$$CBR (\%) = \left( \frac{1197.3 * 14.2233}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}}$$

$$CBR_{km\ 46+000} = 19.4\%$$

A continuación, se presenta los valores de Módulo Resiliente (Esg) y CBR para el sector homogéneo 01:

**Tabla 30:** *Módulo resiliente (Esg) y CBR (%) para el sector homogéneo N° 01*

CARRIL	PROGRESIVA (KM)	ESPEJOR e (cm)	TEMP. PAV. °C	D0 (Dmax.)	D25	D50	D75	D130	Rc (m)	Esg (kg/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)
Derecho	46+000	2.5	31	33	28	14	9	7	658	1197.3	19.4
Izquierdo	46+025	2.5	31	64	43	36	14	5	146	496.8	4.9
Derecho	46+050	2.5	31	57	45	28	21	14	263	622.4	7
Izquierdo	46+075	2.5	31	102	64	50	40	24	82	368.7	3.1
Derecho	46+100	2.5	31	76	62	47	40	24	219	304.4	2.3
Izquierdo	46+125	2.5	31	74	40	31	24	12	94	849.2	11.3
Derecho	46+150	2.5	31	81	57	47	28	2	132	373.6	3.1



CARRIL	PROGRESIVA (KM)	ESPEJOR e (cm)	TEMP. PAV. °C	D0 (Dmax.)	D25	D50	D75	D130	Rc (m)	Esg (kg/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)
Izquierdo	46+175	2.5	31	59	40	31	21	9	165	574.9	6.2
Derecho	46+200	2.5	31	52	24	14	9	5	110	1422.3	25.4
Izquierdo	46+225	2.5	31	52	28	17	9	5	132	1179	18.9
Derecho	46+250	2.5	31	38	24	9	7	5	219	1342.6	23.2
Izquierdo	46+275	2.5	31	45	31	21	17	7	219	818.3	10.7
Derecho	46+300	2.5	31	71	50	43	28	17	146	409.7	3.6
Izquierdo	46+325	2.5	31	47	38	26	19	2	329	666.2	7.8
Derecho	46+350	2.5	31	45	21	19	14	9	132	1568.9	29.6
Izquierdo	46+375	2.5	31	59	36	26	21	9	132	678.2	8
Derecho	46+400	2.5	31	31	21	14	9	5	329	1198.3	19.4
Izquierdo	46+425	2.5	31	57	36	21	24	7	146	917.5	12.8
Derecho	46+450	2.5	33	64	43	21	14	5	147	772.5	9.8
Izquierdo	46+475	2.5	31	57	47	31	19	9	329	571.2	6.1
Derecho	46+500	2.5	33	47	31	24	14	7	189	741.4	9.2
Izquierdo	46+525	2.5	31	69	52	38	26	12	188	468.3	4.5
Derecho	46+550	2.5	33	69	47	33	24	12	147	541.9	5.6
Izquierdo	46+575	2.5	31	69	38	26	17	9	101	897.8	12.4
Derecho	46+600	2.5	33	54	38	26	14	5	189	680	8
Izquierdo	46+625	2.5	31	71	50	28	14	7	146	614.5	6.8
Derecho	46+650	2.5	33	71	54	38	31	12	189	473	4.5
Izquierdo	46+675	2.5	31	62	36	21	9	5	120	943.7	13.4
Derecho	46+700	2.5	33	59	40	31	21	12	165	577	6.2
Izquierdo	46+725	2.5	31	62	45	33	17	7	188	533.3	5.5
Derecho	46+750	2.5	33	54	40	28	17	9	220	621.7	7

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

El análisis y resultados de los demás sectores homogéneos se presenta en el capítulo de resultados y discusión.

### 3.7.2. Cálculo del módulo resiliente por el método de hogg riguroso

A fin de comprobar y corroborar los resultados que se obtuvo en el método de Hogg Simplificado, se realizó también los cálculos siguiendo el Método De Hogg Riguroso y/o Original de forma numérica, para el cual se siguió el siguiente procedimiento:

- a) En primer lugar, se identifica los coeficientes y variables de ajuste de curvas del CASO II de la Tabla 10 teniendo lo siguiente:
  - Profundidad del estrato rígido ( $h/L0$ ) = 10
  - Coeficiente de Poisson ( $U0$ ) = 0.40
  - Factor de influencia ( $I$ ) = 0.1689



- Si  $Dr/D0 > 0.426$  entonces
  - $1/\alpha=2.629$
  - $1/\beta=0.548$
  - $B=0$
- Si  $Dr/D0 < 0.426$  entonces
  - $1/\alpha=2283.4$
  - $1/\beta=0.2004$
  - $B=3$
- Para la longitud característica (L0)
  - $y0=0.602$
  - $m=0.192$
- Relación de rigidez por carga puntual y carga distribuida (S0/S)
  - $\dot{m}=0.48$
- Radio de huella (A) =  $\sqrt{\frac{P}{\pi * p}} = \sqrt{\frac{4082}{\pi * 80}} = 4.03" = 10.2 \text{ cm}$

b) Se determina la longitud característica, teniéndose los siguientes valores para el CASO II, progresiva 46+000 del carril derecho:

$$D0=0.3323\text{mm}$$

$$Dr=0.1424\text{mm}$$

$$R=50\text{cm}$$

$$U0=0.40$$

$$H/L0=10$$

$$A=10.2\text{cm}$$

$$P(\text{Carga})=4082 \text{ kg}$$

$$\frac{Dr}{D0} = \frac{0.1424}{0.3323} = 0.43 > 0.426, \text{ ver tabla 10}$$

Obteniendo los coeficientes  $1/\alpha$ ,  $1/\beta$  y B de la tabla 10 y reemplazando todos los valores en la ecuación 2 de la tabla 9, se tiene:

$$r_{50} = R * \frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} - B}{\left(\frac{1}{\alpha} * \left(\frac{D0}{Dr} - 1\right)\right)^{\frac{1}{\beta}} - B}$$

$$r50 = 50 * \frac{(2.629)^{0.548} - 0}{\left(2.629 * \left(\frac{0.3323}{0.1424} - 1\right)\right)^{0.548} - 0} = 42.7$$

El valor de  $r50$  es un dato para encontrar la longitud característica; asimismo, se debe obtener los valores de los coeficientes  $y0$  y  $m$  de la tabla 10. Y sustituir todos los valores en la ecuación C de la tabla 9, se obtiene:

$$L0 = \frac{y0 * r50 + ((y0 * r50)^2 - 4 * m * A * r50)^{\frac{1}{2}}}{2}$$
$$L0 = \frac{0.602 * 42.7 + ((0.602 * 42.7)^2 - 4 * 0.192 * 10.2 * 42.7)^{\frac{1}{2}}}{2} = 21.9$$

- c) Una vez obtenida la longitud característica de  $L0 = 21.9 \text{ cm}$ , se puede hallar el valor de módulo resiliente ( $Esg$ ), de la siguiente manera:
- ❖ Como primer paso se halla el valor de la relación teórica entre la rigidez para carga puntual y la de carga distribuida en un área, para un cociente dado de  $A/L0$ , cuya expresión está dada por la ecuación D de la tabla 9:

$$\left(\frac{S0}{S}\right) = 1 - m * \left(\frac{A}{L0} - 0.1\right)$$

Si  $\frac{A}{L0} < 0.2$ , entonces  $\left(\frac{S0}{S}\right) = 1$

$$\frac{A}{L0} = \frac{10.2}{21.9} = 0.47 > 0.2, \text{ entonces:}$$
$$\left(\frac{S0}{S}\right) = 1 - 0.48 * \left(\frac{10.2}{21.9} - 0.1\right) = 0.82$$

- ❖ Como segundo y último paso, se reemplaza los valores obtenidos anteriormente en la ecuación A de la tabla 9:

$$Esg = I * \frac{(1 + u0)(3 - 4u0)}{2(1 - u0)} * \left(\frac{S0}{S}\right) * \frac{P}{D0 * L0}$$
$$Esg = 0.1689 * \frac{(1 + 0.4)(3 - 4 * 0.4)}{2(1 - 0.4)} * (0.82) * \frac{4086}{0.03323 * 21.9}$$
$$Esg = Mr = 1277.5 \frac{kg}{cm^2}$$

- d) Por último, de manera indirecta se puede calcular el valor de CBR (%) utilizando la ecuación recomendada por el MEPDG (Mechanistic Empirical



Pavement Design Guide) y el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos (MTC, 2014), despejando el valor de CBR se tiene:

$$CBR = \left( \frac{Mr * 14.2233}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}}$$

Donde:

Mr: Módulo de resiliencia en kg/cm<sup>2</sup>

CBR: Valor de capacidad de soporte en %

Para nuestro ejemplo:

$$CBR (\%) = \left( \frac{1277.5 * 14.2233}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}}$$

$$CBR_{km\ 46+000} = 21.4\%$$

Es importante señalar que para validar los resultados del “Método de Hogg Simplificado” se ha empleado el cálculo del Módulo Resiliente por el “Método de Hogg Riguroso”, a fin de comparar y corroborar la confiabilidad de los resultados encontrados.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS DE LA TRAMIFICACIÓN DE SECTORES HOMOGÉNEOS

La metodología utilizada para determinar la sectorización es de las Diferencias acumuladas recomendada por la (AASHTO, 1993)-Apéndice J según su comportamiento estructural (Deflexión máxima).

##### 4.1.1. Resumen de sectores homogéneos definidos

De acuerdo al procedimiento descrito en los acápite anteriores, se identificó (04) cuatro sectores homogéneos que se presentan a continuación:

**Tabla 31:** *Resumen de sectores homogéneos*

TRAMO	PKI	PKF	LONGITUD
1	46+000	46+750	750
2	46+750	48+100	1350
3	48+100	49+550	1450
4	49+550	50+000	450

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

La conformación de los sectores homogéneos, generalmente obedece a cambios de pendiente en el gráfico  $Z_x$  Vs Progresiva; que, sin embargo, también pueden ser definidos por el tipo de estructura de pavimento, valor de CBR, etc. Para esta investigación, se consideró tener como criterio de sectorización la deflexión máxima, toda vez que representa el parámetro más importante dentro del Análisis Deflectométrico.

##### 4.1.2. Resumen de puntos de evaluación definidos

Una vez obtenida la sectorización homogénea, se procedió a identificar puntos de ensayo representativos para cada sector, tal como se presenta a continuación.

**Tabla 32:** Resumen de puntos de evaluación para ensayos de laboratorio y densidad natural

Sector			Puntos de muestreo para ensayos en laboratorio			Puntos de evaluación para densidad natural		
Sector	PK inicial	PK final	Muestra	Ubicación Km	Lado	Punto	Ubicación Km	Lado
1	46+000	46+750	M-01	46+460	Derecho	1	46+050	Derecho
						2	46+460	Derecho
2	46+750	48+100	M-02	47+610	Derecho	3	47+610	Derecho
						4	47+830	Izquierdo
3	48+100	49+550	M-03	48+200	Derecho	5	48+200	Derecho
						6	48+740	Derecho
4	49+550	50+000	M-04	49+840	Izquierdo	7	49+670	Izquierdo
						8	49+840	Izquierdo

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Del cuadro anterior se infiere que, los resultados de laboratorio de la muestra 01 serán los representativos para el intervalo con Pk inicial 46+000 al Pk final 46+750, la muestra 02 para el intervalo con Pk inicial 46+750 al Pk final 48+100, la muestra 03 para el intervalo con Pk inicial 48+100 al Pk final 49+550 y la muestra 04 para el intervalo con Pk inicial 49+550 al Pk final 50+000.

## 4.2. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICO – MECÁNICO DE LA SUBRASANTE

La metodología utilizada para determinar la caracterización física-mecánica del material de subrasante está establecida en el Manual de Ensayo de Materiales aprobada con R.D. N°18-2016-MTC/14, el cual ha sido desarrollado enteramente en el Laboratorio De Suelos y Pavimentos de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno con la metodología descrita en los acápites anteriores, cuyos resultados permitirán evaluar la calidad del material de subrasante.

### 4.2.1. Certificados de ensayos realizados al material de subrasante

Los certificados de los ensayos realizados se presentan en el Anexo 4.

### 4.2.2. Resumen de los resultados de evaluación del material de subrasante mediante ensayos de laboratorio

A continuación, se presenta el cuadro resumen de la caracterización física-mecánica del material de subrasante para las (04) cuatro muestras evaluadas.

**Tabla 33:** Resumen general de la caracterización física - mecánica del material de subrasante

<b>RESUMEN GENERAL PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE MATERIAL DEL SUBRASANTE</b>																											
Ítem	Ubicación	Muestra	Lado	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (% QUE PASA)											HN	Límites de consistencia	Clasificación	Próctor Modificado	C.B.R al 0.1"								
				2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Nº 4	Nº10	Nº 20	Nº 40	Nº 60	Nº 100						Nº 200	(%)	L.L	L.P	I.P	AAASHTO	SUCS	MDS
1	46+460	M-01	Der.	100	99.2	87.1	71.3	50	38	28.9	22.7	18.2	15.6	12.2	9.2	4.9	NP	NP	NP	A-1-a(0)	GP-GM	2.12	8.2	17.2	33.7	95%	100%
2	47+610	M-02	Der.	100	94.2	86.9	71.5	59.5	46.4	36.5	29.7	25.1	20.9	15.8	5.1	21.6	19.7	1.9	A-1-b(0)	SM	2.11	8.4	7.5	19.4			
3	48+200	M-03	Der.	100	99.3	91.9	86.4	69.9	57.2	45.1	35	27.8	22.6	18	12.1	6.4	20.6	20.5	0.1	A-1-a(0)	SM	2.09	8.5	11.2	28.5		
4	49+840	M-04	Izq.	100	96.3	89.2	83.5	69.8	56.8	44.1	34.7	28.4	23.7	19	12.8	6.2	NP	NP	NP	A-1-a(0)	SM	2.11	8.2	17.6	27		

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo



Del cuadro anterior se tiene:

- Según la clasificación SUCS, el tipo de suelo para la Muestra 01 es GP-GM (Grava mal Gradada-Grava Limosa), Muestra 02, 03 y 04 un SM (Arena Limosa).
- Según la clasificación AASHTO, para la Muestra 01, 03 y 04 se tiene un suelo tipo A-1-a (0), mientras que para la Muestra 02 un A-1-b (0).
- El porcentaje de grava (%) de las muestras 01, 02, 03, 04 es de 62.03, 40.47, 42.80 y 43.20 respectivamente.
- El porcentaje de arena (%) de las muestras 01, 02, 03, 04 es de 28.81, 43.69, 45.11 y 43.97 respectivamente.
- El porcentaje de finos (%) de las muestras 01, 02, 03, 04 es de 9.16, 15.85, 12.09 y 12.84 respectivamente.
- El límite líquido para la Muestra 01 es NP, Muestra 02 es 21.56, Muestra 03 es 20.57 y Muestra 04 es NP.
- El límite plástico para la Muestra 01 es NP, Muestra 02 es 19.71, Muestra 03 es 20.46 y Muestra 04 es NP.
- El Índice de plasticidad para la Muestra 01 es NP, Muestra 02 es 1.85, Muestra 03 es 0.11 y Muestra 04 es NP, lo que significa que las cuatro muestras tienen un bajo potencial de expansión y una baja plasticidad cualificándose como suelos poco arcillosos.
- El valor de MDS (Máxima Densidad Seca) calculada del ensayo Proctor para la muestra 01, 02, 03 y 04 es de 2.115, 2.106, 2.088 y 2.105 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente, mientras que, el % OCH (Óptimo contenido de Humedad) para la muestra 01, 02, 03 y 04 es de 8.2, 8.4, 8.45 y 8.2 % respectivamente.
- El valor de CBR de la muestra 01 (km 46+460) al 100% de la máxima densidad seca a 0.1” es de 33.7%, para la muestra 02 (km 47+610) de 19.4%, para la



muestra 03 (km 48+200) de 28.5% y para la muestra 04 (km 49+000) de 27%, con lo cual queda evidenciado que el material estudiado no puede ser considerado como material de Subbase, puesto que no cumple el valor mínimo admisible de CBR de 40% referido al 100% de la Máxima Densidad Seca y una Penetración de Carga de 0.1” (2.5 mm); tal como lo indica la Tabla 402-02 del Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción (EG-2013), en consecuencia, se puede afirmar que el material estudiado corresponde a la subrasante.

- El valor de densidad natural seca corregida por sobre tamaño de la Muestra 01 es de 1.961 gr/cm<sup>3</sup>, de la Muestra 02 de 2.004 gr/cm<sup>3</sup>, de la Muestra 03 de 1.957 gr/cm<sup>3</sup> y de la Muestra 04 de 1.928 gr/cm<sup>3</sup>; del cual se puede deducir que son valores menores al 95% de la MDS (Máxima Densidad Seca).
- El valor de CBR a la densidad seca natural a 0.1” de la muestra 01, 02, 03 y 04 es de 11.5, 7.8, 8.6 y 10.6% respectivamente, por lo que se puede afirmar que el valor de CBR a la densidad seca natural es menor a el valor de CBR a la Máxima Densidad Seca. Asimismo, se puede afirmar que, la disminución del valor de densidad seca pudo haberse debido a los ciclos de saturación del pavimento durante su vida útil reflejándose en la “Capacidad Portante existente de la Subrasante”.

### **4.3. RESULTADOS DEL MÓDULO RESILIENTE MEDIANTE CBR DE LABORATORIO**

#### **4.3.1. Resumen de los resultados de CBR a la densidad natural**

A continuación, se presenta el resumen de los ensayos de CBR en laboratorio practicado a las (04) cuatro muestras representativas del tramo km 46+000 al km 50+000 de la ruta PE34U.

**Tabla 34:** Resumen de los ensayos de CBR a la densidad natural

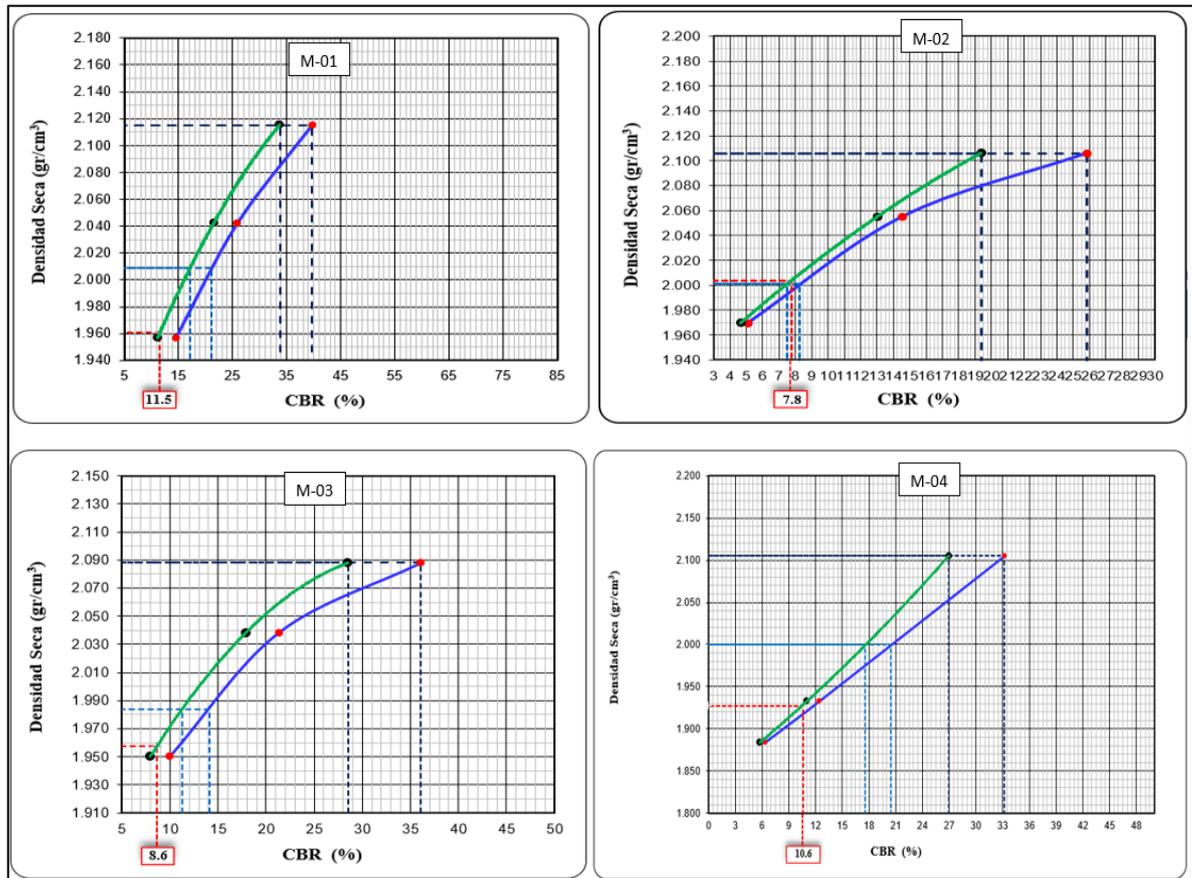
Sector	SECTORES HOMOGENEOS		UBICACIÓN			CBR (%)				
	PK inicial	PK final	Muestra	Ubicación (km)	Lado	C.B.R. al 100% de la M.D.S. a 0.1" (%)	C.B.R. al 95% de la M.D.S. a 0.1" (%)	C.B.R. al 100% de la M.D.S. a 0.2" (%)	C.B.R. al 95% de la M.D.S. a 0.2" (%)	C.B.R. a la densidad natural 0.1" (%)
1	46+000	46+750	M-01	46+460	Derecho	33.7	17.2	39.8	21.1	<b>11.5</b>
2	46+750	48+100	M-02	47+610	Derecho	19.4	7.5	25.8	8.3	<b>7.8</b>
3	48+100	49+550	M-03	48+200	Derecho	28.5	11.2	36.1	14.1	<b>8.6</b>
4	49+550	50+000	M-04	49+840	Izquierdo	27.0	17.6	33.2	20.5	<b>10.6</b>

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Se presenta los gráficos de Densidad Seca (gr/cm<sup>3</sup>) Vs CBR (%), donde se determinó el valor de CBR a la densidad seca natural:

**Figura 60**

Densidad Seca (gr/cm<sup>3</sup>) Vs CBR (%)



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

#### 4.3.2. Resumen de los resultados del módulo resiliente correlacionado

Es importante señalar que, el valor de CBR representativo será el correspondiente al C.B.R. a la densidad natural, puesto que, el objetivo es encontrar la “Capacidad Portante existente de la Subrasante” al momento de la medición in situ, todo ello para fines de comparación con el análisis deflectométrico.

A continuación, se presenta el reporte de módulo resiliente correlacionado con el CBR a la densidad natural, aplicando la relación matemática recomendada por el MEPDG que fue previamente detallada en los acápite anteriores.

**Tabla 35:** *Resumen de Módulo Resiliente correlacionado*

SECTORES HOMOGÉNEOS			MUESTRA REPRESENTATIVA			MÓDULO RESILIENTE	
Sector homogéneo	PK inicial	PK final	Muestra	Ubicación	Lado	Módulo Resiliente (PSI)	Módulo Resiliente (kg/cm <sup>2</sup> )
1	46+000	46+750	M-01	46+460	Derecho	12196.6	<b>857.5</b>
2	46+750	48+100	M-02	47+610	Derecho	9513.3	<b>668.9</b>
3	48+100	49+550	M-03	48+200	Derecho	10126.7	<b>712.0</b>
4	49+550	50+000	M-04	49+840	Izquierdo	11576.8	<b>813.9</b>

*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

#### 4.4. RESULTADOS DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN

De acuerdo al Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del (MTC, 2014, p. 171); se desarrolla un deflectograma que permite analizar la variabilidad de la capacidad estructural del pavimento existente y definir para cada sector homogéneo la deflexión característica correspondiente, que es el valor que mejor representa a un sector en particular.

#### 4.4.1. Resumen de deflexiones corregidas y análisis estadístico

Los formatos de recolección de datos en campo y procesamiento se presentan en el Anexo 1, a continuación, se presenta el cuadro de deflexiones corregidas y radio de curvatura:

**Tabla 36:** *Resumen de deflexiones corregidas y radio de curvatura*

CARRIL	PROGRESIVA (KM)	ESPEJOR e(cm)	TEMP PAV. °C	D0 (Dmax.)	D25	D50	D75	D130	Rc (m)
Derecho	46+000	2.5	31	33	28	14	9	7	658
Izquierdo	46+025	2.5	31	64	43	36	14	5	146
Derecho	46+050	2.5	31	57	45	28	21	14	263
Izquierdo	46+075	2.5	31	102	64	50	40	24	82
Derecho	46+100	2.5	31	76	62	47	40	24	219
Izquierdo	46+125	2.5	31	74	40	31	24	12	94
Derecho	46+150	2.5	31	81	57	47	28	2	132
Izquierdo	46+175	2.5	31	59	40	31	21	9	165
Derecho	46+200	2.5	31	52	24	14	9	5	110
Izquierdo	46+225	2.5	31	52	28	17	9	5	132
Derecho	46+250	2.5	31	38	24	9	7	5	219
Izquierdo	46+275	2.5	31	45	31	21	17	7	219
Derecho	46+300	2.5	31	71	50	43	28	17	146
Izquierdo	46+325	2.5	31	47	38	26	19	2	329
Derecho	46+350	2.5	31	45	21	19	14	9	132
Izquierdo	46+375	2.5	31	59	36	26	21	9	132
Derecho	46+400	2.5	31	31	21	14	9	5	329
Izquierdo	46+425	2.5	31	57	36	21	24	7	146
Derecho	46+450	2.5	33	64	43	21	14	5	147
Izquierdo	46+475	2.5	31	57	47	31	19	9	329
Derecho	46+500	2.5	33	47	31	24	14	7	189
Izquierdo	46+525	2.5	31	69	52	38	26	12	188
Derecho	46+550	2.5	33	69	47	33	24	12	147
Izquierdo	46+575	2.5	31	69	38	26	17	9	101
Derecho	46+600	2.5	33	54	38	26	14	5	189
Izquierdo	46+625	2.5	31	71	50	28	14	7	146
Derecho	46+650	2.5	33	71	54	38	31	12	189
Izquierdo	46+675	2.5	31	62	36	21	9	5	120
Derecho	46+700	2.5	33	59	40	31	21	12	165
Izquierdo	46+725	2.5	31	62	45	33	17	7	188
Derecho	46+750	2.5	33	54	40	28	17	9	220
Izquierdo	46+775	2.5	31	114	85	45	24	17	110
Derecho	46+800	2.5	33	71	50	35	19	7	147
Izquierdo	46+825	2.5	31	62	33	24	14	7	110
Derecho	46+850	2.5	34	59	40	24	12	5	165
Izquierdo	46+875	2.5	31	47	43	33	19	7	658



CARRIL	PROGRESIVA (KM)	ESPESOR e(cm)	TEMP PAV. °C	D0 (Dmax.)	D25	D50	D75	D130	Rc (m)
Derecho	46+900	2.5	34	73	54	42	28	7	165
Izquierdo	46+925	2.5	31	64	47	33	19	12	188
Derecho	46+950	2.5	34	94	47	35	21	9	66
Izquierdo	46+975	2.5	30	95	69	52	36	19	119
Derecho	47+000	2.5	34	71	47	24	14	5	132
Izquierdo	47+025	2.5	30	64	43	29	14	7	146
Derecho	47+050	2.5	34	92	68	50	35	14	132
Izquierdo	47+075	2.5	30	100	90	74	52	24	328
Derecho	47+100	2.5	34	47	40	26	12	5	441
Izquierdo	47+125	2.5	30	71	57	45	26	10	219
Derecho	47+150	2.5	34	92	61	45	24	9	102
Izquierdo	47+175	2.5	30	69	59	48	31	10	328
Derecho	47+200	2.5	31	74	59	47	33	19	219
Izquierdo	47+225	2.5	30	88	69	55	38	17	164
Derecho	47+250	2.5	31	66	43	26	14	5	132
Izquierdo	47+275	2.5	30	71	50	33	21	10	146
Derecho	47+300	2.5	31	66	45	31	17	7	146
Izquierdo	47+325	2.5	30	57	43	29	14	7	219
Derecho	47+350	2.5	31	59	47	38	31	7	263
Izquierdo	47+375	2.5	30	90	71	45	21	17	164
Derecho	47+400	2.5	31	95	64	47	33	19	101
Izquierdo	47+425	2.5	30	74	59	40	26	17	219
Derecho	47+450	2.5	31	40	28	17	7	5	263
Izquierdo	47+475	2.5	30	67	43	29	21	17	131
Derecho	47+500	2.5	31	69	45	26	17	9	132
Izquierdo	47+525	2.5	30	71	52	33	21	7	164
Derecho	47+550	2.5	31	71	55	45	21	7	188
Izquierdo	47+575	2.5	30	67	43	31	21	12	131
Derecho	47+600	2.5	31	93	66	43	26	14	120
Izquierdo	47+625	2.5	30	98	81	62	45	24	188
Derecho	47+650	2.5	31	76	52	26	14	5	131
Izquierdo	47+675	2.5	30	76	50	19	7	5	119
Derecho	47+700	2.5	31	74	43	31	21	7	101
Izquierdo	47+725	2.5	30	81	59	29	10	5	146
Derecho	47+750	2.5	31	76	50	38	26	10	119
Izquierdo	47+775	2.5	30	95	74	50	29	12	146
Derecho	47+800	2.5	31	86	57	40	26	12	110
Izquierdo	47+825	2.5	30	76	62	33	19	5	219
Derecho	47+850	2.5	31	62	36	24	17	7	119
Izquierdo	47+875	2.5	30	78	64	48	33	10	219
Derecho	47+900	2.5	31	100	67	52	33	12	94
Izquierdo	47+925	2.5	30	83	71	55	38	21	263
Derecho	47+950	2.5	31	83	55	40	24	12	110
Izquierdo	47+975	2.5	30	57	48	29	19	7	328
Derecho	48+000	2.5	28	62	31	24	12	7	101
Izquierdo	48+025	2.5	30	48	36	17	7	2	262



CARRIL	PROGRESIVA (KM)	ESPESOR e(cm)	TEMP PAV. °C	D0 (Dmax.)	D25	D50	D75	D130	Rc (m)
Derecho	48+050	2.5	28	81	50	31	17	10	101
Izquierdo	48+075	2.5	30	52	38	24	14	2	219
Derecho	48+100	2.5	28	84	67	45	29	12	187
Izquierdo	48+125	2.5	30	60	45	33	12	5	219
Derecho	48+150	2.5	28	93	72	41	24	2	145
Izquierdo	48+175	2.5	30	50	38	29	17	5	262
Derecho	48+200	2.5	28	84	60	33	17	7	131
Izquierdo	48+225	2.5	30	55	40	21	10	7	219
Derecho	48+250	2.5	28	77	57	31	12	7	163
Izquierdo	48+275	2.5	30	69	45	21	12	7	131
Derecho	48+300	2.5	28	91	67	45	17	7	131
Izquierdo	48+325	2.5	30	105	79	45	14	10	119
Derecho	48+350	2.5	28	98	77	48	29	12	145
Izquierdo	48+375	2.5	30	60	48	33	10	5	262
Derecho	48+400	2.5	28	38	24	24	17	5	218
Izquierdo	48+425	2.5	30	131	112	88	71	36	164
Derecho	48+450	2.5	28	53	36	17	10	2	187
Izquierdo	48+475	2.5	28	65	50	29	12	7	218
Derecho	48+500	2.5	28	84	67	57	38	22	187
Izquierdo	48+525	2.5	28	69	60	34	10	5	326
Derecho	48+550	2.5	28	74	53	29	17	7	145
Izquierdo	48+575	2.5	28	60	50	38	14	7	326
Derecho	48+600	2.5	28	45	31	17	5	2	218
Izquierdo	48+625	2.5	28	36	26	14	10	5	326
Derecho	48+650	2.5	28	77	55	31	7	5	145
Izquierdo	48+675	2.5	28	48	38	22	19	12	326
Derecho	48+700	2.5	28	81	50	24	14	10	101
Izquierdo	48+725	2.5	28	62	48	34	19	5	218
Derecho	48+750	2.5	28	81	57	29	22	10	131
Izquierdo	48+775	2.5	28	50	36	12	7	2	218
Derecho	48+800	2.5	28	72	50	29	14	5	145
Izquierdo	48+825	2.5	28	50	36	24	14	7	218
Derecho	48+850	2.5	28	77	55	29	14	10	145
Izquierdo	48+875	2.5	25	60	51	22	10	5	325
Derecho	48+900	2.5	28	81	65	41	26	17	187
Izquierdo	48+925	2.5	25	79	67	36	19	7	260
Derecho	48+950	2.5	28	72	53	38	17	5	163
Izquierdo	48+975	2.5	25	72	60	29	19	10	260
Derecho	49+000	2.5	28	57	36	29	12	7	145
Izquierdo	49+025	2.5	25	94	79	65	36	22	216
Derecho	49+050	2.5	28	93	69	48	31	17	131
Izquierdo	49+075	2.5	25	72	63	34	14	5	325
Derecho	49+100	2.5	26	94	72	41	14	10	145
Izquierdo	49+125	2.5	25	89	67	41	17	12	144
Derecho	49+150	2.5	26	60	41	26	14	10	163
Izquierdo	49+175	2.5	25	79	67	43	17	10	260



CARRIL	PROGRESIVA (KM)	ESPEJOR e(cm)	TEMP PAV. °C	D0 (Dmax.)	D25	D50	D75	D130	Rc (m)
Derecho	49+200	2.5	26	98	74	46	36	22	130
Izquierdo	49+225	2.5	25	89	79	53	29	17	325
Derecho	49+250	2.5	26	86	65	43	26	12	145
Izquierdo	49+275	2.5	25	60	53	39	12	7	432
Derecho	49+300	2.5	26	58	41	26	14	10	186
Izquierdo	49+325	2.5	25	48	41	24	5	2	432
Derecho	49+350	2.5	26	84	65	34	22	10	163
Izquierdo	49+375	2.5	25	80	67	31	12	7	259
Derecho	49+400	2.5	26	55	34	22	10	5	145
Izquierdo	49+425	2.5	25	77	65	34	14	10	259
Derecho	49+450	2.5	26	60	38	24	14	5	145
Izquierdo	49+475	2.5	25	67	55	31	14	10	259
Derecho	49+500	2.5	26	86	58	41	26	12	108
Izquierdo	49+525	2.5	25	60	41	24	7	2	162
Derecho	49+550	2.5	25	80	58	34	17	12	144
Izquierdo	49+575	2.5	25	29	19	7	5	2	324
Derecho	49+600	2.5	25	60	41	27	17	10	162
Izquierdo	49+625	2.5	24	60	51	22	12	2	323
Derecho	49+650	2.5	25	46	36	19	7	5	324
Izquierdo	49+675	2.5	24	77	58	29	10	5	162
Derecho	49+700	2.5	25	41	31	19	10	7	324
Izquierdo	49+725	2.5	24	58	48	27	15	10	323
Derecho	49+750	2.5	25	46	36	19	10	5	324
Izquierdo	49+775	2.5	24	41	24	10	7	2	185
Derecho	49+800	2.5	25	53	41	27	19	7	259
Izquierdo	49+825	2.5	24	68	56	34	10	5	259
Derecho	49+850	2.5	25	94	80	48	24	10	216
Izquierdo	49+875	2.5	24	111	75	51	27	10	86
Derecho	49+900	2.5	25	39	31	17	10	2	432
Izquierdo	49+925	2.5	24	48	36	19	12	5	259
Derecho	49+950	2.5	25	77	60	34	24	12	185
Izquierdo	49+975	2.5	24	39	27	15	7	2	259
Derecho	50+000	2.5	25	46	36	24	12	7	324
<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>									
<b>PROMEDIO</b>				69	51	33	20	9	201
<b>DESV. STD.</b>				18.2	15.6	12.5	9.8	5.4	94.7
<b>COEF.VAR.</b>				26.4	30.9	38.1	51.5	60.1	47.1
<b>MAXIMO</b>				131	112	88	71	36	658
<b>MINIMO</b>				29	19	7	5	2	66

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la siguiente tabla se estima el análisis estadístico ponderado por sectores homogéneos:

**Tabla 37:** Resumen ponderado de deflexiones y radio característico por sectores homogéneos

Ruta	Sector	PK inicial	PK final	Longitud (km)	Defl. ex. Prom. D0 (1/100mm)	Desv. Est. D0 (1/100mm)	Deflexión Característica a D0 (1/100mm)	Coef. Var. iación D0 (1/100mm)	R. Curva. Prom. RC (m)	Desv. Est. RC (m)	Radio Característico RC (m)	Deflexión Adm. D0 (1/100mm)	Defl. Característica < Defl. Admisible
PE34 U	1	46.00	46.75	0.75	60	14	78	24%	193	108	332	160	Cumple
	2	46.75	48.10	1.35	75	16	95	21%	180	99	307	160	Cumple
	3	48.1	49.55	1.45	72	18	95	25%	205	78	306	160	Cumple
	4	49.55	50.00	0.45	57	21	85	37%	263	84	371	160	Cumple

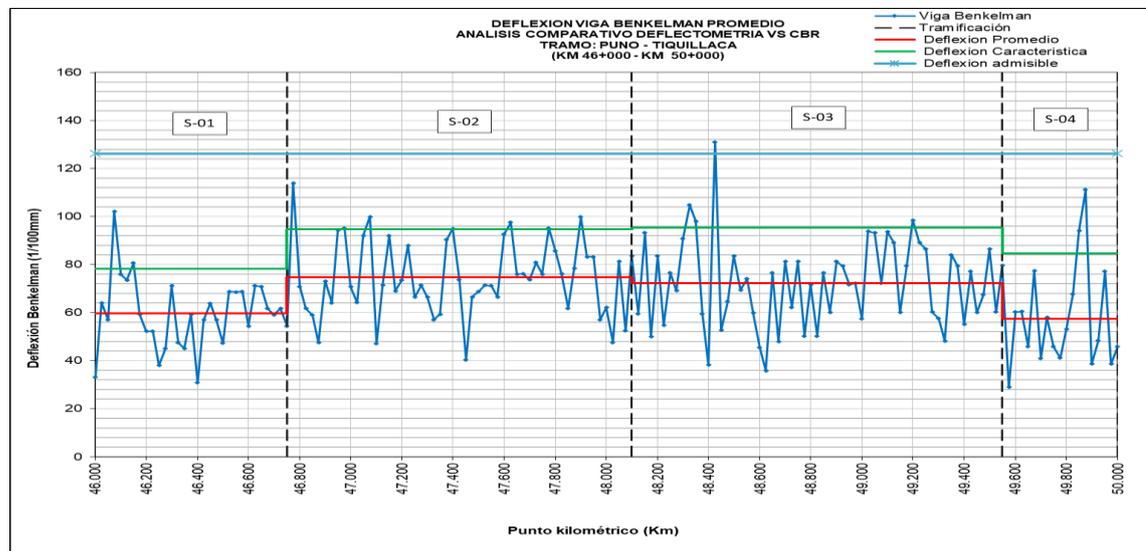
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

De lo anterior se puede verificar que, la máxima deflexión promedio se encuentra en el sector homogéneo 2 con 75, mientras que la mínima deflexión promedio en el sector homogéneo 4 con 57, asimismo, la deflexión característica no supera el valor de la deflexión admisible 160, por lo que el tramo en estudio cumple con los límites del MTC.

A continuación, se presenta el deflectograma, así como el gráfico de radio de curvatura del tramo del Km 46+000 al Km 50+000:

**Figura 61**

Deflexión promedio y característica por sectores homogéneos

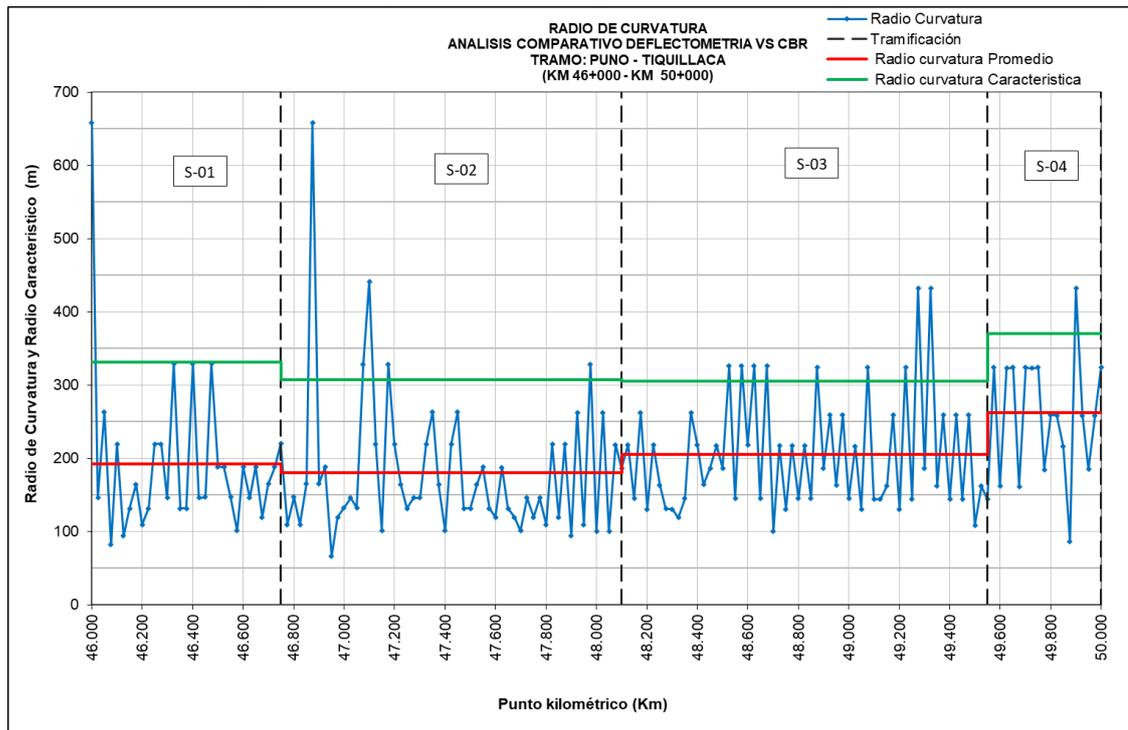


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Del gráfico anterior se tiene que la máxima deflexión característica se encuentra en el sector homogéneo 2 con 95 (1/100mm), mientras que la mínima deflexión característica se encuentra en el sector homogéneo 1 con 78 (1/100mm).

**Figura 62**

*Radio de curvatura promedio y característico por sectores homogéneos*



*Fuente:* Elaborado por el equipo de trabajo

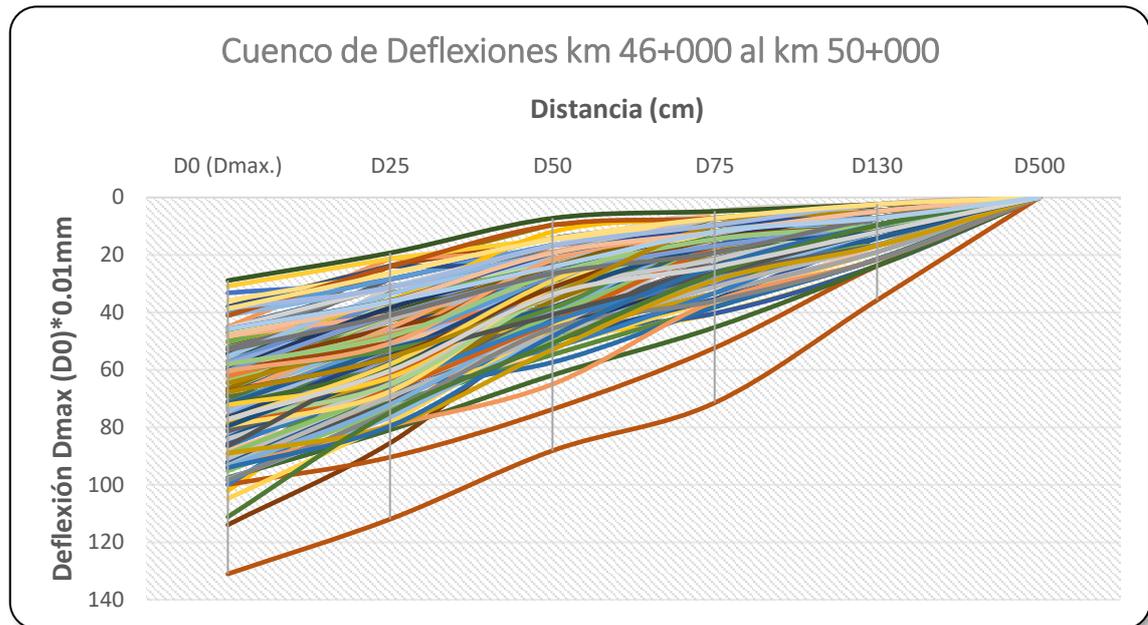
Del gráfico anterior, se tiene que el máximo radio de curvatura característico se encuentra en el sector homogéneo 4 con 371m, mientras que el mínimo radio característico se encuentra en el sector homogéneo 3 con 306m.

#### 4.4.2. Gráfico cuenco de deflexiones por sectores homogéneos

El gráfico de cuenco de deflexiones de los cuatro sectores homogéneos se presenta en el Anexo 2; sin embargo, a continuación, se presenta el gráfico de curvatura de deflexiones general del km 46+000 al km 50+000:

### Figura 63

Cuenco de deflexiones del km 46+000 al km 50+000



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

El gráfico del cuenco de deflexiones se realiza para observar el tipo de curva que genera las deflexiones a distintas distancias (0, 25, 50, 75 y 130 cm), se ha observado en campo que a la distancia de 5m ya no hay variación del dial de medición, por lo que su deflexión a dicha distancia es “cero”.

Las gráficas del cuenco de deflexiones para los cuatro sectores homogéneos en general se muestran prolongadas y no muy profundas salvo excepciones, lo que representa un comportamiento del sistema pavimento-subrasante de regular a bueno.

## 4.5. RESULTADOS DEL MÓDULO RESILIENTE OBTENIDO MEDIANTE EL ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO

### 4.5.1. Resumen de resultado del módulo resiliente por método de Hoog

La siguiente tabla muestra los valores de Módulo Resiliente  $E_{sg}$  (kg/cm<sup>2</sup>) y el valor de CBR (%) obtenidos por medio del “Método de Hogg Simplificado” y el “Método de Hogg Original”.

**Tabla 38:** Resumen de resultados de Módulo resiliente por método de Hogg

CARRIL	DEFLEXIONES CORREGIDAS								Rc (m)	MÉTODO DE HOGG SIMPLIFICADO		MÉTODO DE HOGG ORIGINAL	
	PROGR ESIVA (KM)	ESPE SOR e (cm)	TEMP . °C	D0 (Dmax.)	D25	D50	D75	D130		Esg (kg/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)	Esg (kg/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)
Derecho	46+000	2.5	31	33	28	14	9	7	658	1197.3	19.4	1277.5	21.4
Izquierdo	46+025	2.5	31	64	43	36	14	5	146	496.8	4.9	513.6	5.2
Derecho	46+050	2.5	31	57	45	28	21	14	263	622.4	7.0	646.7	7.4
Izquierdo	46+075	2.5	31	102	64	50	40	24	82	368.7	3.1	369.4	3.1
Derecho	46+100	2.5	31	76	62	47	40	24	219	304.4	2.3	310.7	2.4
Izquierdo	46+125	2.5	31	74	40	31	24	12	94	849.2	11.3	809.0	10.5
Derecho	46+150	2.5	31	81	57	47	28	2	132	373.6	3.1	380.9	3.2
Izquierdo	46+175	2.5	31	59	40	31	21	9	165	574.9	6.2	596.4	6.5
Derecho	46+200	2.5	31	52	24	14	9	5	110	1422.3	25.4	1189.2	19.2
Izquierdo	46+225	2.5	31	52	28	17	9	5	132	1179.0	18.9	1144.4	18.1
Derecho	46+250	2.5	31	38	24	9	7	5	219	1342.6	23.2	1385.8	24.3
Izquierdo	46+275	2.5	31	45	31	21	17	7	219	818.3	10.7	860.9	11.6
Derecho	46+300	2.5	31	71	50	43	28	17	146	409.7	3.6	421.0	3.8
Izquierdo	46+325	2.5	31	47	38	26	19	2	329	666.2	7.8	701.3	8.4
Derecho	46+350	2.5	31	45	21	19	14	9	132	1568.9	29.6	1401.2	24.8
Izquierdo	46+375	2.5	31	59	36	26	21	9	132	678.2	8.0	699.4	8.4
Derecho	46+400	2.5	31	31	21	14	9	5	329	1198.3	19.4	1288.9	21.7
Izquierdo	46+425	2.5	31	57	36	21	24	7	146	917.5	12.8	923.9	12.9
Derecho	46+450	2.5	33	64	43	21	14	5	147	772.5	9.8	779.7	9.9
Izquierdo	46+475	2.5	31	57	47	31	19	9	329	571.2	6.1	594.5	6.5
Derecho	46+500	2.5	33	47	31	24	14	7	189	741.4	9.2	779.1	9.9
Izquierdo	46+525	2.5	31	69	52	38	26	12	188	468.3	4.5	481.9	4.7
Derecho	46+550	2.5	33	69	47	33	24	12	147	541.9	5.6	556.1	5.8
Izquierdo	46+575	2.5	31	69	38	26	17	9	101	897.8	12.4	860.9	11.6
Derecho	46+600	2.5	33	54	38	26	14	5	189	680.0	8.0	707.5	8.5
Izquierdo	46+625	2.5	31	71	50	28	14	7	146	614.5	6.8	623.9	7.0
Derecho	46+650	2.5	33	71	54	38	31	12	189	473.0	4.5	485.6	4.7
Izquierdo	46+675	2.5	31	62	36	21	9	5	120	943.7	13.4	925.4	13.0
Derecho	46+700	2.5	33	59	40	31	21	12	165	577.0	6.2	598.7	6.6
Izquierdo	46+725	2.5	31	62	45	33	17	7	188	533.3	5.5	552.4	5.8
Derecho	46+750	2.5	33	54	40	28	17	9	220	621.7	7.0	648.5	7.4
Izquierdo	46+775	2.5	31	114	85	45	24	17	110	398.4	3.5	392.8	3.4
Derecho	46+800	2.5	33	71	50	35	19	7	147	506.6	5.1	519.4	5.3
Izquierdo	46+825	2.5	31	62	33	24	14	7	110	1022.5	15.1	977.1	14.1
Derecho	46+850	2.5	34	59	40	24	12	5	165	733.1	9.0	752.9	9.4
Izquierdo	46+875	2.5	31	47	43	33	19	7	658	614.5	6.8	647.2	7.4
Derecho	46+900	2.5	34	73	54	42	28	7	165	416.2	3.7	426.9	3.9
Izquierdo	46+925	2.5	31	64	47	33	19	12	188	536.4	5.5	553.9	5.8
Derecho	46+950	2.5	34	94	47	35	21	9	66	742.6	9.2	663.9	7.7
Izquierdo	46+975	2.5	30	95	69	52	36	19	119	346.8	2.8	349.9	2.8
Derecho	47+000	2.5	34	71	47	24	14	5	132	681.0	8.0	685.4	8.1
Izquierdo	47+025	2.5	30	64	43	29	14	7	146	623.8	7.0	640.5	7.3



CARRIL	PROGR ESIVA (KM)	ESPE SOR e (cm)	TEMP . °C	D0 (Dmax.)	D25	D50	D75	D130	Rc (m)	MÉTODO DE HOGG SIMPLIFICAD O		MÉTODO DE HOGG ORIGINAL	
										Esg (kg/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)	Esg (kg/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)
Derecho	47+050	2.5	34	92	68	50	35	14	132	366.4	3.0	370.3	3.1
Izquierdo	47+075	2.5	30	100	90	74	52	24	328	239.0	1.6	239.9	1.6
Derecho	47+100	2.5	34	47	40	26	12	5	441	669.7	7.8	705.2	8.5
Izquierdo	47+125	2.5	30	71	57	45	26	10	219	380.3	3.2	390.5	3.4
Derecho	47+150	2.5	34	92	61	45	24	9	102	407.2	3.6	410.6	3.6
Izquierdo	47+175	2.5	30	69	59	48	31	10	328	395.4	3.4	407.0	3.6
Derecho	47+200	2.5	31	74	59	47	33	19	219	369.6	3.1	378.9	3.2
Izquierdo	47+225	2.5	30	88	69	55	38	17	164	325.2	2.5	329.8	2.6
Derecho	47+250	2.5	31	66	43	26	14	5	132	664.6	7.7	676.9	7.9
Izquierdo	47+275	2.5	30	71	50	33	21	10	146	539.6	5.6	551.7	5.8
Derecho	47+300	2.5	31	66	45	31	17	7	146	579.7	6.2	595.2	6.5
Izquierdo	47+325	2.5	30	57	43	29	14	7	219	621.2	6.9	645.3	7.4
Derecho	47+350	2.5	31	59	47	38	31	7	263	392.8	3.4	407.2	3.6
Izquierdo	47+375	2.5	30	90	71	45	21	17	164	403.5	3.5	407.6	3.6
Derecho	47+400	2.5	31	95	64	47	33	19	101	385.3	3.3	388.0	3.3
Izquierdo	47+425	2.5	30	74	59	40	26	17	219	442.0	4.1	453.0	4.2
Derecho	47+450	2.5	31	40	28	17	7	5	263	1024.4	15.2	1078.3	16.5
Izquierdo	47+475	2.5	30	67	43	29	21	17	131	623.2	7.0	637.3	7.2
Derecho	47+500	2.5	31	69	45	26	17	9	132	659.8	7.6	669.1	7.8
Izquierdo	47+525	2.5	30	71	52	33	21	7	164	539.6	5.6	551.7	5.8
Derecho	47+550	2.5	31	71	55	45	21	7	188	381.0	3.2	391.4	3.4
Izquierdo	47+575	2.5	30	67	43	31	21	12	131	578.5	6.2	593.9	6.5
Derecho	47+600	2.5	31	93	66	43	26	14	120	427.1	3.9	429.6	3.9
Izquierdo	47+625	2.5	30	98	81	62	45	24	188	276.8	2.0	278.9	2.0
Derecho	47+650	2.5	31	76	52	26	14	5	131	642.3	7.3	643.0	7.3
Izquierdo	47+675	2.5	30	76	50	19	7	5	119	651.7	7.5	651.2	7.5
Derecho	47+700	2.5	31	74	43	31	21	7	101	792.5	10.2	770.3	9.7
Izquierdo	47+725	2.5	30	81	59	29	10	5	146	596.0	6.5	595.6	6.5
Derecho	47+750	2.5	31	76	50	38	26	10	119	474.3	4.6	484.2	4.7
Izquierdo	47+775	2.5	30	95	74	50	29	12	146	365.2	3.0	368.2	3.1
Derecho	47+800	2.5	31	86	57	40	26	12	110	449.7	4.2	454.9	4.3
Izquierdo	47+825	2.5	30	76	62	33	19	5	219	539.6	5.6	547.9	5.7
Derecho	47+850	2.5	31	62	36	24	17	7	119	942.1	13.3	923.8	12.9
Izquierdo	47+875	2.5	30	78	64	48	33	10	219	365.9	3.0	373.7	3.1
Derecho	47+900	2.5	31	100	67	52	33	12	94	349.9	2.8	351.7	2.9
Izquierdo	47+925	2.5	30	83	71	55	38	21	263	325.4	2.5	331.0	2.6
Derecho	47+950	2.5	31	83	55	40	24	12	110	449.1	4.2	455.5	4.3
Izquierdo	47+975	2.5	30	57	48	29	19	7	328	621.2	6.9	645.3	7.4
Derecho	48+000	2.5	28	62	31	24	12	7	101	1099.4	17.0	1008.2	14.8
Izquierdo	48+025	2.5	30	48	36	17	7	2	262	985.1	14.3	1016.1	15.0
Derecho	48+050	2.5	28	81	50	31	17	10	101	561.1	5.9	563.5	6.0
Izquierdo	48+075	2.5	30	52	38	24	14	2	219	739.3	9.1	769.4	9.7
Derecho	48+100	2.5	28	84	67	45	29	12	187	397.1	3.5	403.7	3.5



CARRIL	DEFLEXIONES CORREGIDAS								Rc (m)	MÉTODO DE HOGG SIMPLIFICADO		MÉTODO DE HOGG ORIGINAL	
	PROGR ESIVA (KM)	ESPE SOR e (cm)	TEMP . °C	D0 (Dmax.)	D25	D50	D75	D130		Esg (kg/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)	Esg (kg/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)
Izquierdo	48+125	2.5	30	60	45	33	12	5	219	527.3	5.4	547.6	5.7
Derecho	48+150	2.5	28	93	72	41	24	2	145	447.4	4.2	448.7	4.2
Izquierdo	48+175	2.5	30	50	38	29	17	5	262	606.4	6.7	636.6	7.2
Derecho	48+200	2.5	28	84	60	33	17	7	131	528.1	5.4	530.9	5.4
Izquierdo	48+225	2.5	30	55	40	21	10	7	219	799.1	10.3	823.2	10.8
Derecho	48+250	2.5	28	77	57	31	12	7	163	567.7	6.0	574.3	6.1
Izquierdo	48+275	2.5	30	69	45	21	12	7	131	715.6	8.7	719.1	8.7
Derecho	48+300	2.5	28	91	67	45	17	7	131	401.5	3.5	405.5	3.6
Izquierdo	48+325	2.5	30	105	79	45	14	10	119	404.3	3.6	402.4	3.5
Derecho	48+350	2.5	28	98	77	48	29	12	145	383.4	3.3	385.1	3.3
Izquierdo	48+375	2.5	30	60	48	33	10	5	262	527.3	5.4	547.6	5.7
Derecho	48+400	2.5	28	38	24	24	17	5	218	1333.4	22.9	1375.7	24.1
Izquierdo	48+425	2.5	30	131	112	88	71	36	164	177.1	1.0	174.8	1.0
Derecho	48+450	2.5	28	53	36	17	10	2	187	868.9	11.7	893.8	12.3
Izquierdo	48+475	2.5	28	65	50	29	12	7	218	620.2	6.9	636.6	7.2
Derecho	48+500	2.5	28	84	67	57	38	22	187	323.8	2.5	329.3	2.6
Izquierdo	48+525	2.5	28	69	60	34	10	5	326	535.7	5.5	549.4	5.7
Derecho	48+550	2.5	28	74	53	29	17	7	145	606.5	6.7	613.0	6.8
Izquierdo	48+575	2.5	28	60	50	38	14	7	326	442.1	4.1	458.8	4.3
Derecho	48+600	2.5	28	45	31	17	5	2	218	994.9	14.5	1032.9	15.4
Izquierdo	48+625	2.5	28	36	26	14	10	5	326	1169.1	18.7	1237.5	20.4
Derecho	48+650	2.5	28	77	55	31	7	5	145	567.7	6.0	574.3	6.1
Izquierdo	48+675	2.5	28	48	38	22	19	12	326	812.7	10.6	850.1	11.3
Derecho	48+700	2.5	28	81	50	24	14	10	101	667.5	7.8	655.9	7.6
Izquierdo	48+725	2.5	28	62	48	34	19	5	218	529.2	5.4	547.8	5.7
Derecho	48+750	2.5	28	81	57	29	22	10	131	593.0	6.5	592.4	6.5
Izquierdo	48+775	2.5	28	50	36	12	7	2	218	837.7	11.1	869.7	11.8
Derecho	48+800	2.5	28	72	50	29	14	5	145	610.2	6.8	619.2	6.9
Izquierdo	48+825	2.5	28	50	36	24	14	7	218	735.3	9.0	768.6	9.7
Derecho	48+850	2.5	28	77	55	29	14	10	145	602.1	6.6	606.2	6.7
Izquierdo	48+875	2.5	25	60	51	22	10	5	325	776.2	9.8	790.8	10.1
Derecho	48+900	2.5	28	81	65	41	26	17	187	445.6	4.1	453.1	4.2
Izquierdo	48+925	2.5	25	79	67	36	19	7	260	500.2	5.0	507.6	5.1
Derecho	48+950	2.5	28	72	53	38	17	5	163	467.9	4.5	480.1	4.6
Izquierdo	48+975	2.5	25	72	60	29	19	10	260	606.4	6.7	615.1	6.8
Derecho	49+000	2.5	28	57	36	29	12	7	145	618.0	6.9	641.8	7.3
Izquierdo	49+025	2.5	25	94	79	65	36	22	216	333.5	2.6	336.9	2.7
Derecho	49+050	2.5	28	93	69	48	31	17	131	381.6	3.2	384.9	3.3
Izquierdo	49+075	2.5	25	72	63	34	14	5	325	533.5	5.5	545.1	5.7
Derecho	49+100	2.5	26	94	72	41	14	10	145	445.6	4.1	446.7	4.2
Izquierdo	49+125	2.5	25	89	67	41	17	12	144	444.7	4.1	448.3	4.2
Derecho	49+150	2.5	26	60	41	26	14	10	163	670.7	7.8	691.3	8.2
Izquierdo	49+175	2.5	25	79	67	43	17	10	260	414.7	3.7	423.0	3.8



CARRIL	DEFLEXIONES CORREGIDAS								Rc (m)	MÉTODO DE HOGG SIMPLIFICADO		MÉTODO DE HOGG ORIGINAL	
	PROGR ESIVA (KM)	ESPE SOR e (cm)	TEMP . °C	D0 (Dmax.)	D25	D50	D75	D130		Esg (kg/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)	Esg (kg/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)
Derecho	49+200	2.5	26	98	74	46	36	22	130	401.5	3.5	402.4	3.5
Izquierdo	49+225	2.5	25	89	79	53	29	17	325	335.9	2.7	340.4	2.7
Derecho	49+250	2.5	26	86	65	43	26	12	145	420.7	3.8	426.1	3.9
Izquierdo	49+275	2.5	25	60	53	39	12	7	432	439.1	4.0	455.6	4.3
Derecho	49+300	2.5	26	58	41	26	14	10	186	670.9	7.8	694.4	8.3
Izquierdo	49+325	2.5	25	48	41	24	5	2	432	728.0	8.9	764.2	9.6
Derecho	49+350	2.5	26	84	65	34	22	10	163	525.9	5.4	528.5	5.4
Izquierdo	49+375	2.5	25	80	67	31	12	7	259	560.3	5.9	564.4	6.0
Derecho	49+400	2.5	26	55	34	22	10	5	145	978.6	14.1	981.0	14.2
Izquierdo	49+425	2.5	25	77	65	34	14	10	259	532.9	5.5	540.7	5.6
Derecho	49+450	2.5	26	60	38	24	14	5	145	721.3	8.8	739.9	9.1
Izquierdo	49+475	2.5	25	67	55	31	14	10	259	571.4	6.1	586.1	6.3
Derecho	49+500	2.5	26	86	58	41	26	12	108	445.5	4.1	450.4	4.2
Izquierdo	49+525	2.5	25	60	41	24	7	2	162	718.8	8.7	737.2	9.1
Derecho	49+550	2.5	25	80	58	34	17	12	144	528.4	5.4	534.5	5.5
Izquierdo	49+575	2.5	25	29	19	7	5	2	324	1578.5	29.8	1677.9	32.8
Derecho	49+600	2.5	25	60	41	27	17	10	162	668.0	7.8	688.2	8.2
Izquierdo	49+625	2.5	24	60	51	22	12	2	323	773.3	9.8	787.7	10.1
Derecho	49+650	2.5	25	46	36	19	7	5	324	892.9	12.2	933.7	13.1
Izquierdo	49+675	2.5	24	77	58	29	10	5	162	596.2	6.5	599.9	6.6
Derecho	49+700	2.5	25	41	31	19	10	7	324	900.4	12.4	952.6	13.6
Izquierdo	49+725	2.5	24	58	48	27	15	10	323	666.9	7.8	690.0	8.2
Derecho	49+750	2.5	25	46	36	19	10	5	324	892.9	12.2	933.7	13.1
Izquierdo	49+775	2.5	24	41	24	10	7	2	185	1349.8	23.4	1365.0	23.8
Derecho	49+800	2.5	25	53	41	27	19	7	259	665.3	7.7	694.2	8.3
Izquierdo	49+825	2.5	24	68	56	34	10	5	259	529.5	5.4	544.3	5.7
Derecho	49+850	2.5	25	94	80	48	24	10	216	378.5	3.2	381.6	3.2
Izquierdo	49+875	2.5	24	111	75	51	27	10	86	363.4	3.0	361.3	3.0
Derecho	49+900	2.5	25	39	31	17	10	2	432	1021.0	15.1	1080.6	16.5
Izquierdo	49+925	2.5	24	48	36	19	12	5	259	884.1	12.1	919.0	12.8
Derecho	49+950	2.5	25	77	60	34	24	12	185	532.5	5.5	540.3	5.6
Izquierdo	49+975	2.5	24	39	27	15	7	2	259	1143.0	18.0	1199.7	19.4
Derecho	50+000	2.5	25	46	36	24	12	7	324	723.1	8.8	762.3	9.6

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

De la aplicación estadística de los datos mediante el programa SPSS se tiene:

**Tabla 39:** Resumen estadístico descriptivo de Módulo Resiliente (kg/cm<sup>2</sup>)

		DESCRIPTIVOS		
		ESTADÍSTICO	ERROR ESTÁNDAR	
Método de Hogg Simplificado	Media	632.2832	20.68905	
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	591.4244	
		Límite superior	673.1421	
	Media recortada al 5%	610.2523		
	Mediana	578.5000		
	Varianza	68913.907		
	Desviación estándar	262.51458		
	Mínimo	177.10		
	Máximo	1578.50		
	Rango	1401.40		
	Rango intercuartil	292.15		
	Asimetría	1.326	0.191	
	Curtosis	1.938	0.380	
	Método de Hogg Riguroso	Media	642.8466	20.75228
95% de intervalo de confianza para la media		Límite inferior	601.8629	
		Límite superior	683.8303	
Media recortada al 5%		621.6735		
Mediana		595.2000		
Varianza		69335.829		
Desviación estándar		263.31697		
Mínimo		174.80		
Máximo		1677.90		
Rango		1503.10		
Rango intercuartil		314.75		
Asimetría		1.252	0.191	
Curtosis		1.755	0.380	

Fuente: Programa SPSS

#### 4.5.2. Resumen de resultados de módulo resiliente por sectores homogéneos

La siguiente tabla muestra los valores ponderados de Módulo Resiliente *Esg* (kg/cm<sup>2</sup>) y el valor de CBR (%) por sectores homogéneos.

**Tabla 40:** Resumen de resultados de Módulo Resiliente por sectores homogéneos

Ruta	Sector	PK inicial	PK final	Longitud (km)	Módulo Resiliente Promedio (Kg/cm <sup>2</sup> )	CBR Promedio (%)
PE34U	1	46.000	46.750	0.750	755.6	10.2
	2	46.750	48.100	1.350	549.3	6.1
	3	48.100	49.550	1.450	588.8	6.7
	4	49.550	50.000	0.450	808.8	11.2

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Del cuadro anterior se puede inferir que el sector homogéneo 4 tiene el mayor valor de Módulo Resiliente con 808.8 Kg/cm<sup>2</sup>, mientras que el sector homogéneo 2 es el que tiene el menor valor de Módulo Resiliente con 549.3 Kg/cm<sup>2</sup>.

#### 4.6. COMPARACIÓN DE MÓDULO RESILIENTE OBTENIDO MEDIANTE EL ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO Y CORRELACIONES DE CBR

A continuación, se presenta el módulo resiliente (kg/cm<sup>2</sup>) y CBR (%) calculado por las dos maneras: Correlación de CBR obtenido en laboratorio y Análisis Deflectométrico con fines de comparación:

**Tabla 41:** Comparación de Módulo Resiliente obtenido por deflectometría y correlación de CBR

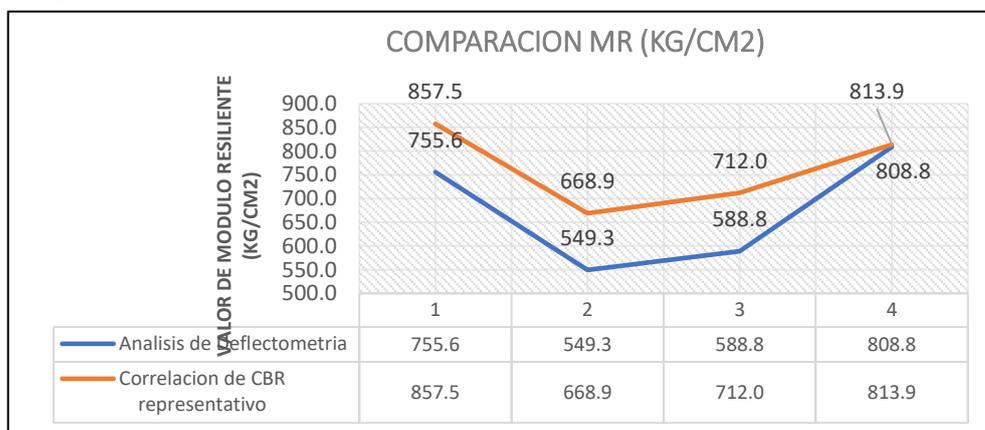
Sector	Sector Homogéneo			Análisis de Deflectometría		Correlación de CBR representativo	
	PK inicial	PK final	Longitud (m)	Módulo Resiliente (Kg/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)	Módulo Resiliente (Kg/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)
1	46.000	46.750	0.750	755.6	10.2	857.5	11.5
2	46.750	48.100	1.350	549.3	6.1	668.9	7.8
3	48.100	49.550	1.450	588.8	6.7	712.0	8.6
4	49.550	50.000	0.450	808.8	11.2	813.9	10.6

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Se concluye que, el análisis por deflectometría presenta menores valores del módulo resiliente (kg/cm<sup>2</sup>) respecto a la Correlación de CBR obtenido en laboratorio en los cuatro sectores; a excepción del CBR (%) del sector 4 que puede ser parte del error muestral. La comparación del módulo resiliente (kg/cm<sup>2</sup>) se presenta a continuación.

**Figura 64**

Comparación de modulo resiliente obtenido por deflectometría y correlación de CBR

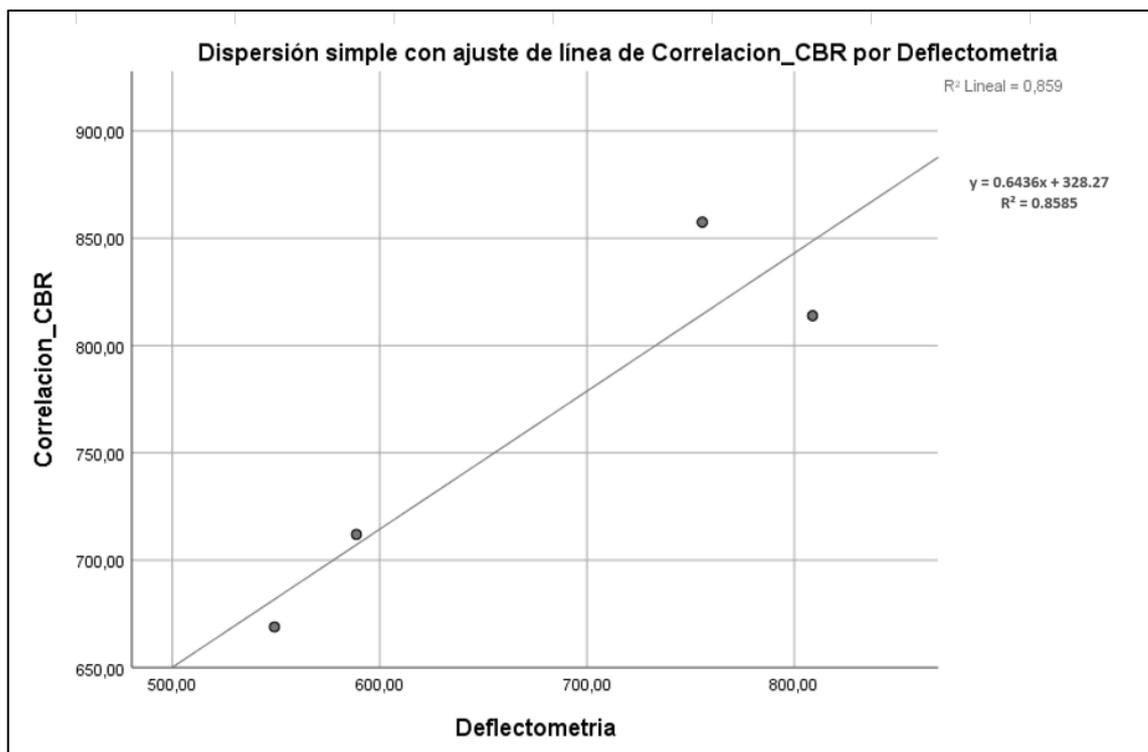


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Por otro lado, de acuerdo con el análisis inferencial y usando el paquete estadístico SPSS, se ha obtenido un coeficiente de correlación de Pearson igual a 0.927, coeficiente de relación  $p$  igual a 0.073 ( $p > 0.05$ ) y el Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) igual a 0.8585 (85.9%). El nivel de confianza seleccionado es 90%. El modelo de regresión lineal explica la fuerza de relación entre las variables analizadas, entonces, la ecuación de la siguiente figura puede ser utilizado para predecir valores o un rango de valores deseados para el Módulo Resiliente obtenido por correlación de CBR en laboratorio y por el análisis deflectométrico.

### Figura 65

*Modelo lineal de regresión de módulo resiliente obtenido por deflectometría y correlación de CBR*



Fuente: Programa SPSS

## 4.7. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

A continuación, se verifica el cumplimiento de los (03) tres objetivos específicos y del objetivo general planteados para la presente investigación:

- **Objetivo específico 1:** Determinar el Módulo Resiliente de la subrasante mediante el Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman a partir del Modelo Matemático de Hogg Simplificado.
- **Hipótesis específica 1:** Es posible determinar el Módulo Resiliente de una subrasante mediante el Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman a partir del Modelo Matemático de Hogg Simplificado.

Se cumplió el objetivo planteado, ya que se pudo determinar el Módulo Resiliente mediante el Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman a partir del Método de Hogg Simplificado, cuyos resultados fueron corroborados estadísticamente con los resultados del Método de Hogg Riguroso, en consecuencia, se pudo validar que la primera hipótesis específica planteada es cierta.

Utilizando el paquete estadístico SPSS tiene:

- 1) Prueba de normalidad según Kolmogorov - Smirnov para datos  $N > 50$ , nivel de confianza del 95% se obtiene:

**Tabla 42:** Prueba de normalidad entre el método de hogg simplificado y el método de hogg riguroso

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
<b>Método de Hogg Simplificado</b>	0.141	161	0	0.898	161	0
<b>Método de Hogg Riguroso</b>	0.124	161	0	0.908	161	0

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: Programa SPSS

Del cuadro anterior se obtiene un valor de Sig.  $0.000 < 0.05$ ; por tanto, se concluye que los datos no siguen una distribución normal, por lo que para la prueba de hipótesis se aplicará el coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ).

2) Prueba de Hipótesis para datos  $N=161 > 50$ , nivel de confianza del 95% se tiene:

- **Hipótesis Nula;**  $H_0$ : No existe correlación entre módulo resiliente ( $Mr$ ) obtenido a través del “Método de Hogg Simplificado” y módulo resiliente ( $Mr$ ) obtenido a través del “Método de Hogg Riguroso”.
- **Hipótesis Alternativa;**  $H_1$ : Si existe correlación entre módulo resiliente ( $Mr$ ) obtenido a través del “Método de Hogg Simplificado” y módulo resiliente ( $Mr$ ) obtenido a través del “Método de Hogg Riguroso”.

**Tabla 43:** Prueba de hipótesis entre el método de hogg simplificado y el método de hogg riguroso

			Método de Hogg Simplificado	Método de Hogg Riguroso
Rho de Spearman	Método de Hogg Simplificado	Coefficiente de correlación	1	,997**
		Sig. (bilateral)		0
		N	161	161
	Método de Hogg Riguroso	Coefficiente de correlación	,997**	1
		Sig. (bilateral)	0	
		N	161	161

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral)

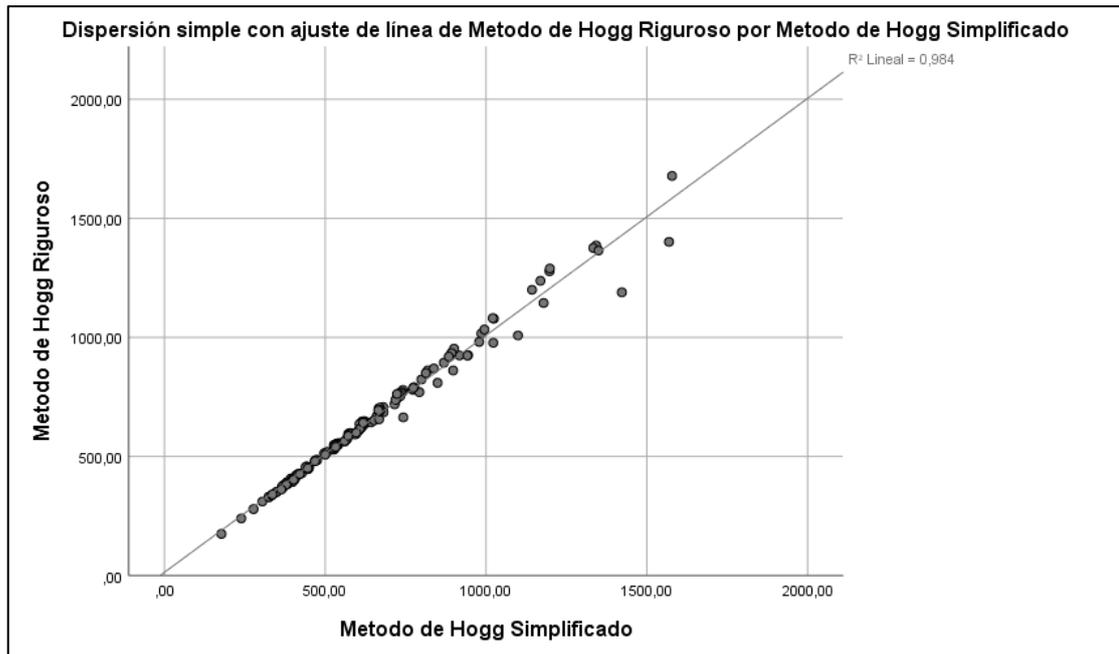
Fuente: Programa SPSS

Del cuadro anterior se obtiene un valor de Sig.  $0.000 < 0.05$  por tanto se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna, asimismo, se muestra un grado de correlación de Spearman ( $\rho$ ) de 0.997 que según (Martínez Rebollar & Campos Francisco, 2015, p. 185), indica una relación “positiva muy alta”.

Los resultados de la muestra seleccionada se presentan en el siguiente gráfico, donde se observa que los valores se ubican prácticamente sobre la línea de igualdad, de la cual se interpreta que los resultados de los dos métodos son estadísticamente similares, validándose de esta manera los resultados de  $Mr$  por el “Método de Hogg Simplificado”.

### Figura 66

Modelo de dispersión lineal de de la comparación entre el método de hogg simplificado y el método de hogg riguroso



Fuente: Programa SPSS

- **Objetivo específico 2:** Determinar la caracterización Físico – Mecánica existente de la Subrasante mediante Ensayos Geotécnicos.
- **Hipótesis específica 2:** Al realizar los ensayos geotécnicos se determina la caracterización Físico - Mecánica existente de la Subrasante.

Se cumplió el objetivo planteado, ya que se pudo determinar mediante ensayos geotécnicos la caracterización Físico - Mecánica existente de la Subrasante (ver Anexo 4), en consecuencia, se pudo validar que la segunda hipótesis específica planteada es cierta.

- **Objetivo específico 3:** Determinar la correlación que existe del módulo resiliente ( $M_r$ ) de la subrasante obtenido a través del Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman y Ensayos de CBR.

- **Hipótesis específica 3:** Existe una correlación del módulo resiliente ( $M_r$ ) de la subrasante obtenido a través del Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman y Ensayos de CBR.

Se cumplió el objetivo planteado, ya que se pudo determinar el grado de correlación del módulo resiliente ( $M_r$ ) de la Subrasante obtenido a través del Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman y Ensayos de CBR.

Utilizando el paquete estadístico SPSS tiene:

- 1) Prueba de normalidad según Shapiro – Wilk para datos  $N < 50$ , nivel de confianza del 95% se obtiene:

**Tabla 44:** Prueba de normalidad entre el módulo resiliente por deflectometría y módulo resiliente por correlación de CBR

PRUEBAS DE NORMALIDAD						
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Deflectometría	0.255	4		0.892	4	0.391
Correlación_CBR	0.220	4		0.935	4	0.624

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: Programa SPSS

Del cuadro anterior se observa que el valor de Sig. = 0.391 y 0.624 > 0.05, en consecuencia, se concluye que los datos siguen una distribución normal por lo que utilizamos la prueba estadística del coeficiente de Pearson ( $r$ ).

- 2) Prueba de Hipótesis para datos  $N=4$ , nivel de confianza del 90% se tiene:

- **Hipótesis Nula;**  $H_0$ : No existe correlación entre módulo resiliente ( $M_r$ ) obtenido a través del Análisis de Deflectometría y módulo resiliente ( $M_r$ ) obtenido a través de correlación de ensayos de CBR.”.
- **Hipótesis Alternativa;**  $H_1$ : Si existe correlación entre módulo resiliente ( $M_r$ ) obtenido a través del Análisis de Deflectometría y módulo resiliente ( $M_r$ ) obtenido a través de correlación de ensayos de CBR.

- Nivel de confianza del 90% o un riesgo del 10%  $\alpha=0.10$  (margen de error). Si p-valor  $< 0.1$  se rechaza la  $H_0$  y si p-valor  $> 0.1$  se acepta la  $H_0$  y se rechaza la  $H_1$ .

**Tabla 45:** Prueba de hipótesis entre el módulo resiliente por deflectometría y módulo resiliente por correlación de CBR

		Deflectometría	Correlación_CBR
	Correlación de Pearson	1	0.927
Deflectometría	Sig. (bilateral)	-----	0.073
	N	4	4
	Correlación de Pearson	0.927	1
Correlación_CBR	Sig. (bilateral)	0.073	-----
	N	4	4

Fuente: Programa SPSS

Del cuadro anterior se tiene que el p-valor (0.073)  $< 0.1$ , en consecuencia, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna que indica que si existe correlación entre módulo resiliente ( $M_r$ ) obtenido a través del Análisis de Deflectometría y módulo resiliente ( $M_r$ ) obtenido a través de correlación de ensayos de CBR.

El grado de correlación Pearson ( $r$ ) es de 0.927 que, según (Hernández Sampieri et al., 2014, p. 305), presenta una “correlación positiva muy fuerte”, es decir, a mayor módulo resiliente ( $M_r$ ) obtenido a través del Análisis de Deflectometría mayor será el módulo resiliente ( $M_r$ ) obtenido a través de ensayos de CBR, en consecuencia, se pudo validar que la tercera hipótesis específica planteada es cierta.

- **Objetivo general:** Determinar la Confiabilidad del Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman respecto a los Ensayos de CBR, para estimar el Módulo Resiliente de una Subrasante de un Pavimento Flexible en la carretera Puno – Tiquillaca, 2022.
- **Hipótesis general:** El Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman permite obtener un valor confiable respecto a los ensayos de CBR, en la estimación del Módulo

Resiliente de una Subrasante de un Pavimento Flexible en la carretera Puno – Tiquillaca, 2022.

La hipótesis general se verificó con el logro de los objetivos específicos y el cálculo de coeficiente de determinación ( $r^2$ ).

Tal como se describió precedentemente, si existe correlación teniéndose un grado de correlación de Pearson ( $r$ ) de 0.927, para un nivel de confianza del 90%, el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) es de 0.8585 (85.9%), lo que indica que tiene un alto nivel de confiabilidad, en consecuencia, el modelo de regresión lineal es fiable para previsiones futuras que contengan las características físicas particulares propias de la subrasante ensayada.

Se cumplió con el objetivo general de determinar la Confiabilidad del Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman respecto a los Ensayos de CBR de laboratorio, para estimar el Módulo Resiliente de una Subrasante, para ello, se utilizó el paquete estadístico SPSS, cuyos resultados fueron corroborados estadísticamente tal como se describió en el cumplimiento de los objetivos específicos, en consecuencia, se pudo validar que la hipótesis general planteada es cierta.

#### **4.8. DISCUSIÓN**

Según la evaluación deflectométrica realizada en los tramos de estudio se tiene deflexiones características de 78, 95, 95 y  $85 \cdot 10^{-2}$  mm para los sectores homogéneos N°01, 02, 03 y 04 respectivamente, los cuales no son superiores a la deflexión máxima permitida para el periodo de diseño ( $D_{adm} = 126.23 \cdot 10^{-2}$  mm), en consecuencia, la estructura de pavimento cumple con límites permitidos de deflexión determinadas en el Manual de Carreteras (MTC, 2014, p. 172).

Según la evaluación geotécnica se tiene un tipo de suelo GP-GM para el sector homogéneo N°01 y SM para los sectores homogéneos N°02, 03 y 04; además, se obtuvo



un CBR a la densidad de campo de 11.5, 7.8, 8.6 y 10.6 % y un Módulo Resiliente correlacionado ( $M_r$ ) de 857.5, 668.9, 712.0, y 813.9 Kg/cm<sup>2</sup> para el sector homogéneo N°01, 02, 03 y 04 respectivamente; en consecuencia, se concluye que según las exigencias del Manual de Carreteras (MTC, 2014, p. 35) por el tipo de vía, la categoría de subrasante existente en el tramo analizado (km 46+000 al km 50+000) está en el rango de “regular a buena”.

De los resultados obtenidos de Módulo Resiliente, se ha podido validar la metodología del “Método de Hogg Simplificado” respecto al “Método de Hogg Riguroso” para ciertas condiciones dadas del modelo, por lo que se está de acuerdo con (Del Aguila Rodriguez, 2007, p. 8), donde concluye que, el procedimiento desarrollado permitirá aplicar el análisis de deformaciones al control de calidad en la construcción y evaluación de pavimentos, complementando de esa manera los métodos empíricos y, desde otro punto de vista, las complicaciones de funcionamiento de los métodos mecánicos en particular para la aplicación de procedimientos automatizados de forma rutinaria y fiable.

Dentro de los antecedentes internacionales se encuentra (Soto Salgado & Soruco Paravicini, 2017), donde concluyen que una diferencia entre una metodología y otra se indica estableciendo una relación entre los resultados adquiridos tanto por deflectometría como en el laboratorio. Estas discrepancias de módulo oscilan entre el 0,02 y el 5,89%, siendo la mayoría de los valores comunicados por deflectometría inferiores a los obtenidos en laboratorio.

El módulo resiliente calculado por deflectometría es menor que el obtenido por geotecnia en el contexto del país, según los antecedentes nacionales (Rodriguez Noriega, 2020) concluye que, existe una fuerte correlación entre ambas variables, indicando que a



medida que aumenta el Mr por retro cálculo, el Mr geotécnico también tiende a aumentar o crecer.

De lo mencionado en las conclusiones antes mencionadas se está de acuerdo, toda vez que para la presente investigación se tuvo resultados similares donde los valores de Módulo Resiliente por Deflectometría no superan a los valores obtenidos en laboratorio; sin perjuicio de lo indicado, debemos tener en cuenta que, dichos valores pueden cambiar tal como lo explica (Rodríguez Noriega, 2020); ya que los resultados de la Deflectometría se ven afectados de forma significativa por el tipo de pavimento, la forma de medición y la época del año en que se realiza la medición.

Según (Balarezo Zapata, 2017) concluye que, las evaluaciones estructurales de Viga Benkelman deberían ser la primera opción para los gobiernos locales a la hora de realizar evaluaciones, ya que ayudan a identificar y cuantificar la necesidad de rehabilitación cuando un pavimento se está deteriorando, cuando está llegando al final de su vida útil o cuando es necesario modificar su función, de lo indicado y de acuerdo al procedimiento que se realizó en campo, se está de acuerdo, señalando que el uso de la Viga Benkelman es mucho más versátil y económica que otros equipos y que pueden ser usados en gobiernos locales, sin embargo, también denota mayor incertidumbre y riesgo de error en contraste a equipos más costosos como el FWD.

Por otro lado, según (Malca Barrantes, 2021) concluye que, dado que las correlaciones Mr-CBR tienden a sobrestimar la resistencia de los suelos, los resultados de la investigación demuestran que el Mr obtenida mediante la monitorización y el análisis de las deflexiones ofrece las verdaderas condiciones de la capacidad portante del suelo. Además, se confirma que la Mr. es muy variable y está influida por los niveles de humedad a lo largo del año. Al respecto se está de acuerdo en parte, ya que según los datos obtenidos el Mr por CBR es mayor al obtenido por deflectometría.



Dentro de los antecedentes locales, (Bonifacio Durant, 2022) concluye que, del cálculo de deflexiones, la deflexión característica resulto ser menor a la deflexión admisible, radio de curvatura superior a ochenta metros; lo que indica que el comportamiento del pavimento y la subrasante son buenos, así como también el comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Atuncolla – Complejo Arqueológico Sillustani es “bueno”; sin embargo, al existir patologías presentes en el tramo en estudio, corresponde corregir las fallas de origen superficial. Al respecto, se puede señalar que, las carreteras de mediano a bajo volumen de tránsito generalmente presentan una buena condición estructural, considerando que estas han sido evaluadas en épocas donde el nivel de precipitación hay sido mínimo o nulo, tal como se describió en el presente trabajo de investigación.

Es importante señalar que, las deflexiones bajo carga estática obtenidas por Viga Benkelman son superiores a las generadas por carga dinámica como los deflectómetros de impacto FWD y HWD; esto se debe a una mayor duración de la aplicación de la carga cuando se utiliza la Viga Benkelman. Por lo tanto, los resultados obtenidos a partir de los valores de deflexión bajo condiciones estáticas de carga no representan con precisión los efectos producidos por las cargas en movimiento (vehículos en movimiento), sin embargo, se puede decir que la metodología de deflectometría con Viga Benkelman tiene un buen uso en carreteras de bajo volumen de tránsito y/o limitada capacidad de recursos para estimar el módulo resiliente.

Cabe resaltar que, la metodología de deflectometría con Viga Benkelman al considerar una mayor deflexión denotará una menor capacidad de soporte y por tanto un menor módulo resiliente retro calculado, por otro lado, al obtener una menor deflexión tal como se obtienen de los deflectómetros de impacto (FWD – HWD) denotaran una mayor capacidad de soporte y por tanto un mayor módulo resiliente retro calculado que



tendrá que ser afectado por un factor de ajuste “C” que generalmente se encuentra en el rango de 0.2 a 0.6 tal como se describe en la literatura, en consecuencia, el valor de módulo resiliente retro calculado por diferentes metodologías tendrán cierta relación.



## V. CONCLUSIONES

1. Se determinó el Módulo Resiliente a partir del Análisis de Deflectometría con Viga Benkelman utilizando el Modelo Matemático de Hogg Simplificado para los 04 kilómetros analizados km 46+000 al km 50+000 de la Ruta PE-34U, cuya corroboración estadística se realizó mediante el “Método de Hogg Riguroso”. Se concluye que, utilizando dicha metodología para el sector homogéneo N°01, 02, 03 y 04 se tiene un Módulo Resiliente retro calculado ( $M_r$ ) de 755.6, 549.3, 588.8, y 808.8 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente.
2. La caracterización Física-Mecánica de la Subrasante obteniéndose un tipo de suelo GP-GM para la muestra 01 y SM para las muestras 02, 03 y 04; además, se obtuvo un CBR a la densidad de campo de 11.5, 7.8, 8.6 y 10.6 % y un Módulo Resiliente correlacionado ( $M_r$ ) de 857.5, 668.9, 712.0, y 813.9 Kg/cm<sup>2</sup> para el sector homogéneo N°01, 02, 03 y 04 respectivamente; en consecuencia, se concluye que, la categoría de subrasante existente en el tramo analizado (km 46+000 al km 50+000) está en el rango de “regular a buena”.
3. Se determinó que existe una “correlación positiva muy alta” entre el Módulo Resiliente obtenido por Análisis de Deflectometría y el obtenido por correlaciones de los ensayos de CBR, el grado de correlación de Pearson ( $r$ ) es de 0.927 para un nivel de confianza del 90%, el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) es de 85.9%; por lo que se concluye que, el modelo de regresión lineal obtenido ( $y = 0.6436*x + 328.27$ ), es fiable para mediciones futuras en pavimentos de bajo volumen de tránsito, carreteras de segunda o tercera clase por su nivel de confiabilidad, que contengan las características físicas particulares de la subrasante ensayada.



## VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda tener sumo cuidado en el registro de lecturas de campo con la Viga Benkelman, realizando su anotación de una forma seria y profesional ya que de estos dependerán los resultados en su totalidad; así mismo, verificar que se cumpla con los estándares de carga, presión y medidas del camión de carga y calibración de la Viga Benkelman.
2. Se recomienda el uso de equipos de protección personal y colectiva durante la ejecución de los ensayos de campo y laboratorio para la seguridad personal y colectiva; para el cual es necesario los siguientes implementos: chalecos, cascos, cintas de seguridad, conos de seguridad, mascarilla, entre otros.
3. Se recomienda implementar el Modelo de Hogg Simplificado para determinar el Módulo de Elasticidad ó Módulo de Resiliencia ó CBR de la subrasante, siendo este un método sencillo y practico de rápida verificación para el adecuado dimensionamiento de terraplenes, entre otros materiales granulares de relleno, que reflejen las reales condiciones de campo y estos mismos sean contrastados en la evaluación del pavimento post construcción.
4. Se recomienda para futuras investigaciones, realizar un análisis de la aplicación del Modelo de Hogg Simplificado para diferentes tipos de estructuras de pavimento y condiciones de estacionalidad particulares de cada zona en diferentes épocas del año con un mayor número de pruebas que hagan consistente el análisis estadístico de datos.
5. Se recomienda elaborar estudios comparativos para la estimación del módulo resiliente por análisis deflectométrico con diferentes instrumentos de medición como el equipo FWD, desde distintos tipos de metodologías como, por ejemplo, la AASHTO 93, Hogg Simplificado, Lukanen, Yonapave, entre otros, a fin de obtener suficiente data para



distintos tipos de suelo, y se tenga un mayor grado de confiabilidad en la selección de los mismos.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (1993). *American Association of State Highway and Transportation Officials, Sección Diferencias Acumuladas*. Estados Unidos.
- Arias, F. (2012). *El Proyecto Investigación, Introducción a la Metodología Científica: Vol. Sexta Edición* (Editorial Episteme, Ed.; Sexta Edición). Caracas: República Bolivariana de Venezuela.
- ASTM. (1999). *Práctica Estándar para Estudios de Índice de Condición del Pavimento de Carreteras*. [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D2487. (2017). *Práctica estándar para Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelo)*. Estados Unidos: American Society for Testing and Materials. <https://doi.org/10.1520/D0854-14>
- ASTM D4718. (2015). *Práctica Estándar para Corrección de Peso Unitario y Contenido de Agua para Suelos que Contiene Partículas de Gran Tamaño*. Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- Balarezo Zapata, J. (2017). *Evaluación Estructural Usando Viga Benkelman Aplicada a un Pavimento* [Universidad de Piura]. <https://hdl.handle.net/11042/3135>
- Becerra Salas, M. (2012). *Tópicos de Pavimentos de Concreto*. Lima: Flujo Libre.
- Bonifacio Durant, J. E. (2022). *Evaluación de la Capacidad Estructural del Pavimento Flexible de la Carretera Atuncolla - Complejo Arqueológico Sillustani* [Universidad Nacional de Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/18354>
- Bravo Castro, M. F. (2009). *Metodologías de Evaluación Funcional y Estructural*. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6124/10/capitulo%204.pdf>



- Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). *Manual de Evaluación de Pavimentos*. Venezuela: Programa de Capacitación Académica.
- Cubas de la Torre, R. B. (2017). *Comportamiento Estructural del Pavimento Flexible en la Vía de Evitamiento Sur - Cajamarca Utilizando las Deflexiones Medidas con la Viga Benkelman* [Universidad Privada del Norte].  
<https://hdl.handle.net/11537/11193>
- Del Aguila Rodriguez, P. (2007). *Determinación del Módulo Resiliente del Suelo de Fundación Mediante Método Mecánico - Empírico. Método Hoog Simplificado*. Cuba: Congreso Ibero Latinoamericano de Asfalto.
- Dione, A., Berthaud, Y., Fall, M., Benboudjema, F., & Michou, A. (2014). Implementación de la relación Módulo Resiliente - CBR en Diseño de Pavimentos Mecanicista-Empírico (M. -E). *Revue Cames-Sci. Appl. & de l'Ing*, 1(2), 65–71.  
[https://www.researchgate.net/publication/271829406\\_Implementation\\_of\\_Resilient\\_Modulus\\_-\\_CBR\\_relationship\\_in\\_Mechanistic-Empirical\\_M-E\\_Pavement\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/271829406_Implementation_of_Resilient_Modulus_-_CBR_relationship_in_Mechanistic-Empirical_M-E_Pavement_Design)
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la Investigación: Vol. Cuarta Edición*. McGraw Hill Interamericana.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación: Vol. Sexta Edición*. McGraw Hill Interamericana.
- Hoffman, M., & del Aguila, P. (1985). *Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones (Ensayo no Destructivo)*. Lima: Louis Berger Internacional inc. LAGESA Ingenieros Consultores.



- Huaquisto Cáceres, S. (2015). *Manual de Laboratorio Mecánica de Suelos*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- José Salinas, P. (2010). *Metodología de la Investigación Científica*. Bogotá: Universidad de los Andes.  
[http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/34398/metodologia\\_investigacion.pdf;jsessionid=400AACFC1BB137FC8C39DC244CE36CC9?sequence=1](http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/34398/metodologia_investigacion.pdf;jsessionid=400AACFC1BB137FC8C39DC244CE36CC9?sequence=1)
- Leguía Loarte, P. B., & Pacheco Risco, H. F. (2016). *Evaluación Superficial del Pavimento Flexible por el Método Pavement Condition Index (PCI) en las Vías Arteriales: Cincuentenario, Colon y Miguel Grau (Huacho - Huaura - Lima)*. Lima: Universidad San Martín de Porres.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12727/2311>
- López Estrada, L. C., & Mendoza Diaz, A. (1998). *Evaluación Estructural no Destructiva de Pavimentos* (Publicación Técnica). México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Lugo Lopez, A. J., & Villanueva Diaz, Y. J. (2018). *Evaluación del Comportamiento de la Sub Rasante del Pavimento Existente en la Av. Ciudad de Cali, Localidad de Bosa, por Deflectometría y Ensayos de Laboratorio* [Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <http://hdl.handle.net/11349/22334>
- M. Das, B. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica: Vol. Cuarta Edición*. California: Thomson Learning.
- Malca Barrantes, A. G. (2021). *Factor Estacional del Módulo Resiliente para el Diseño de Pavimentos Flexibles Según AASHTO1993 en el Perú – 2021* [Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/72140>



- Martínez Rebollar, A., & Campos Francisco, W. (2015). Correlación entre Actividades de Interacción Social Registradas con Nuevas Tecnologías y el grado de Aislamiento Social en los Adultos Mayores. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 36(3), 181–191. <https://doi.org/10.17488/RMIB.36.3.4>
- Medina Palacios, A., & de la Cruz Puma, M. (2015). *Evaluación Superficial del Pavimento Flexible del Jr. José Gálvez del Distrito de Lince Aplicando el Método del PCI*. Lima: Universidad Peruana Ciencias Aplicadas.
- Molina Vinasco, G. M., & Alzate Buitrago, A. (2018). *Caracterización Estratigráfica, Física y Mecánica de Suelos Pertenecientes a la Zona de Expansión Urbana del Municipio de Pereira* [Universidad Libre, Ingeniería Civil]. <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/17056>
- Montejo Fonseca, A. (1998). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras: Vol. Segunda Edición*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- MTC. (2014). *Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección: Suelos y Pavimentos*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- MTC. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. [www.mtc.gob.pe](http://www.mtc.gob.pe)
- Rodrigo Osorio, M., & Vidal Valencia, J. (2002). *Módulo Resiliente de Suelos Finogranulares*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Rodríguez Noriega, J. E. (2020). *Evaluación del Módulo Resiliente Fundamentado en la Deflectometría y la Geotecnia para Optimizar Diseños y Costos en Pavimentos Reciclados de la Carretera Yanango-Puente Herrería* [Lima: Universidad San Ignacio de Loyola]. <https://repositorio.usil.edu.pe/handle/usil/10774>
- Soto Salgado, L., & Soruco Paravicini, K. (2017). Comparación de Resultados entre Deflectometría y Ensayos de CBR, Relativos a la Estimación del Módulo



Resiliente. *Bolivia: Ciencia Sur*, 3. <https://1library.co/document/yrdw48pq-comparacion-resultados-deflectometria-ensayos-relativos-estimacion-modulo-resiliente.html>

Tacsá Herrera, E. B., & Rodríguez Paez, B. O. (2018). *Evaluación de Fallas Mediante el Método PCI y Planteamiento de Alternativas de Intervención para Mejorar la Condición Operacional del Pavimento Flexible en el Carril Segregado del Corredor Javier Prado* [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <https://doi.org/10.19083/tesis/624556>

Thenoux Z., G., & Gaete P., R. (1995). *Evaluación Técnica del Pavimento y Comparación de Métodos de Diseño de Capas de Refuerzo Asfáltico*. *Revista de Ingeniería de Construcción*. <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10204>

Vásquez Varela, L. R. (2002). *Pavement Condition Index (PCI) Para Pavimentos Asfálticos y de Concreto en Carreteras* (Ingepav). Manizales: Universidad Nacional de Colombia. <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/manual-pci1.pdf>

Zapata Coacalla, T. (2016). *Ensayos de Mecánica de Suelos*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano, Escuela Profesional de Ingeniería Civil.



## ANEXOS

- ANEXO 1:** Constancia de Deflectometría, formato de recolección y procesamiento de datos del ensayo deflecométrico.
- ANEXO 2:** Gráfico de cuenco de deflexiones de campo.
- ANEXO 3:** Sectorización por el método de diferencias acumuladas.
- ANEXO 4:** Constancia de estudio de mecánica de suelos, ensayos de laboratorio de suelos y perfil estratigráfico.
- ANEXO 5:** Resumen estadístico de correlación de módulo resiliente.
- ANEXO 6:** Panel fotográfico.
- ANEXO 7:** Certificado de calibración de Viga Benkelman.



## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo EVERD VICTOR PARISUAÑA OUISPE  
identificado con DNI 76338258 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA CIVIL

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación para la obtención de  Grado  
 Título Profesional denominado:

"ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DEFLECTOMETRÍA Y ENSAYOS DE CBR PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO  
RESILIENTE DE SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES, PUNO - TIQUILLAGA, 2022"

" Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 19 de MAYO del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo EVERD VICTOR PARISUANJA QUILPE  
, identificado con DNI 76338258 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
INGENIERIA CIVIL

, informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación para la obtención de  Grado  
 Título Profesional denominado:

"ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DEFLECTOMETRIA Y ENSAYOS DE CBR PARA LA ESTIMACIÓN DE  
MÓDULO RESILIENTE DE SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES, PUNO - TTIQUILLACA, 2022"

" Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 19 de MAYO del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo ADAN ROSELI DOELLO CALLATA  
identificado con DNI 70364106 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA CIVIL

, informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación para la obtención de  Grado  
 Título Profesional denominado:

“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DEFLECTOMETRÍA Y ENSAYOS DE CBR PARA LA ESTIMACIÓN  
DEL MÓDULO RESILIENTE DE SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES, PUNO-TIQUILLACA, 2022.”

” Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 19 de Mayo del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo ADAN RUSSELL QUELLO CALLATA  
, identificado con DNI 70364106 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA CIVIL

, informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación para la obtención de  Grado

Título Profesional denominado:

“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DEFLECTOMETRÍA Y ENSAYOS DE CBR PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES, PUÑO-TIQUILACA, 2022.”

” Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 19 de Mayo del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella