

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA CARRETERA SAN MIGUEL - PABLO, TRAMO SAN MIGUEL - SUNUDEN; MEDIANTE EL ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO.

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

BACHILLER: RONALD EDUARDO CARAHUATAY CHÁVEZ

ASESOR: Ing. ALEJANDRO CUBAS BECERRA

Cajamarca - Perú

2015

COPYRIGHT © 2015 by
RONALD EDUARDO CARAHUATAY CHÁVEZ
Todos los derechos reservados

DEDICATORIA

A **Dios** quien me guio e ilumino por el sendero del bien, proporcionándome la luz para ser una persona virtuosa.

A mi **Madre**, fiel amiga que desde mi nacimiento me inculco valores para engrandecer mi alma y ser lo que soy ahora.

A mis hermanos **Diana** y **José** por estar siempre presentes, orientándome y brindándome amor fraternal.

A la Familia **Murga Mendoza**, por su afecto, estimación y apoyo incondicional hacia mi persona.

Al **Ing. Alfredo Hernández Chávarry**, por ser el tutor que supo encaminarme, en los primeros pasos de esta nueva etapa profesional.

A mis amigos Roosevelt Díaz, Mayle Fernández, Carina Murga, William Hernández, Harland Díaz; por estar conmigo e inculcarme una verdadera amistad.

AGRADECIMIENTO

Agradezco el apoyo y orientación de mi Asesor, el **Ing. Alejandro Cubas Becerra**, que con su conocimiento, experiencia y tiempo me guiaron en la elaboración de la presente Tesis. La cual servirá como una guía para futura investigaciones.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|--------------|
| <i>DEDICATORIA</i> | <i>III</i> |
| <i>AGRADECIMIENTO</i> | <i>IV</i> |
| <i>RESUMEN</i> | <i>XVII</i> |
| <i>ABSTRACT</i> | <i>XVIII</i> |
| | |
| <i>CAPÍTULO I</i> | <i>1</i> |
| | |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 2 |
| 1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | 3 |
| 1.4. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN | 3 |
| 1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN | 4 |
| 1.6. OBJETIVOS | 4 |
| 1.5.1. OBJETIVO GENERAL | 4 |
| 1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 4 |
| | |
| <i>CAPITULO II</i> | <i>5</i> |
| | |
| MARCO TEÓRICO | 5 |
| 2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS | 5 |
| 2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES | 5 |
| 2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES | 6 |
| 2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES | 6 |
| 2.2. BASES TEÓRICAS | 7 |
| 2.2.1. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO | 7 |
| 2.2.2. PAVIMENTO FLEXIBLE | 9 |
| A. Carpeta Asfáltica | 9 |
| B. Base | 10 |
| C. Subbase | 12 |
| D. Subrasante | 13 |
| 2.2.3. ESFUERZOS PRODUCIDOS EN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO ASFALTICO | 14 |
| 2.2.4. TIPOS DE FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES | 16 |

| | | |
|--|--|--------|
| 2.2.5. | EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS | 20 |
| 2.2.6. | SOLICITACIONES PRINCIPALES DE UN PAVIMENTO..... | 22 |
| 2.2.4.1. | TRÁNSITO..... | 22 |
| 2.2.4.2. | CLIMA..... | 23 |
| 2.2.7. | MODELOS DE COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO..... | 24 |
| 2.2.8. | MÉTODOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL..... | 27 |
| 2.2.6.1. | MÉTODOS DIRECTOS DE AUSCULTACIÓN..... | 28 |
| 2.2.6.2. | MÉTODOS INDIRECTOS DE AUSCULTACIÓN ESTRUCTURAL | 29 |
| A. | MEDICIÓN DE DEFLEXIONES POR MEDIO DE CARGAS ESTÁTICAS | 30 |
| B. | MEDICIÓN DE DEFLEXIÓN POR CARGAS DE IMPACTO | 32 |
| 2.2.9. | VIGA BENKELMAN | 33 |
| 2.2.10. | DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO..... | 36 |
| 2.2.7.1. | PROCEDIMIENTO | 37 |
| 2.2.7.2. | TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS..... | 43 |
| A. | CÁLCULO DE LAS DEFLEXIONES..... | 43 |
| B. | CORRECCIÓN POR TEMPERATURA | 45 |
| C. | CORRECCIÓN POR ESTACIONALIDAD | 46 |
| 2.2.7.3. | ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS USANDO LA METODOLOGÍA CONREVIAl..... | 47 |
| A. | DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA..... | 47 |
| B. | DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA..... | 48 |
| C. | DEFLEXIÓN ADMISIBLE | 50 |
| D. | DEFLEXIÓN CRÍTICA..... | 51 |
| 2.2.7.4. | CRITERIOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO | 51 |
| <i>CAPITULO III</i> | | 56 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | | 56 |
| 3.1. | PERIODO DE ESTUDIO | 56 |
| 3.2. | UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO | 56 |
| 3.3. | TIPO DE CARRETERA..... | 57 |
| 3.4. | MATERIALES E INSTRUMENTOS | 58 |
| <i>CAPITULO IV</i> | | 61 |
| ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | | 61 |
| 4.1. | INFORMACIÓN PRELIMINAR | 61 |
| 4.2. | ANTECEDENTES..... | 61 |
| 4.3. | CARGA DE TRÁNSITO | 61 |

| | |
|--|------------|
| 4.4. APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA MEDICIONES DE DEFORMACIONES EN PAVIMENTOS | 62 |
| 4.5. MUESTREO Y UNIDADES DE MUESTRA | 62 |
| 4.6. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN | 64 |
| 4.7. DETERMINACIÓN DE LAS DEFLEXIONES EN EL PAVIMENTO ... | 65 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-01 | 67 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-02 | 68 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-03 | 69 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-04 | 70 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-05 | 71 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-06 | 72 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-07 | 73 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-08 | 74 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-09 | 75 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-10 | 76 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-11 | 77 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-12 | 78 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-13 | 79 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-14 | 80 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-15 | 81 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-16 | 82 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-17 | 83 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-18 | 84 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-19 | 85 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-20 | 86 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-21 | 87 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-22 | 88 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-23 | 89 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-24 | 90 |
| UNIDAD DE MUESTRA U-25 | 91 |
| 4.8. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 92 |
| <i>CAPITULO V</i> | 99 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 99 |
| 5.1. CONCLUSIONES | 99 |
| 5.2. RECOMENDACIONES | 101 |
| <i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> | 102 |
| <i>ANEXO 1 NORMA MTC E 1002-2000</i> | 103 |

| | |
|---|------------|
| <i>ANEXO 2 ESTUDIO DE TRÁFICO.....</i> | <i>108</i> |
| <i>ANEXO 3 ESTUDIO DE SUELOS.....</i> | <i>114</i> |
| <i>ANEXO 4 NORMA ASTM D-4695.....</i> | <i>124</i> |
| <i>ANEXO 5 FOTOGRAFIAS DE UNIDADES DE MUESTRA</i> | <i>131</i> |
| <i>ANEXO 6 CALIBRACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN</i> | <i>137</i> |
| <i>ANEXO 7 PLANO DE UBICACION.....</i> | <i>144</i> |
| <i>ANEXO 8 PLANO DE SECCIONES TIPICAS</i> | <i>146</i> |
| <i>ANEXO 9 PLANO DE UBICACIÓN DE MUESTRAS.....</i> | <i>148</i> |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| <i>Tabla N° 2.01 Tipo de carpeta asfáltica según intensidad del tránsito</i> | 10 |
| <i>Tabla N° 2.02. Características Físico-mecánicas.</i> | 10 |
| <i>Tabla N° 2.03. Requerimientos Agregado Grueso.</i> | 11 |
| <i>Tabla N° 2.04. Requerimientos Agregado Fino.</i> | 11 |
| <i>Tabla N° 2.05. Requerimientos de Ensayos Especiales.</i> | 12 |
| <i>Tabla N° 2.06. Categorías de Subrasante.</i> | 13 |
| <i>Tabla N° 2.07. Determinación teórica de deflexiones según la fórmula propuesta por Ahlvín y Ulery.</i> | 27 |
| <i>Tabla N° 2.08. Tabla de distancias para ensayos.</i> | 37 |
| <i>Tabla N° 2.09. Tabla de Lecturas tomadas en Campo, km 23+000 - km 24+000.....</i> | 44 |
| <i>Tabla N° 2.10. Tabla de Cálculo de Deflexiones, km 23+000 - km 24+000.</i> | 44 |
| <i>Tabla N° 2.11. Tabla de Cálculo de Deflexiones Corregidas por Temperatura, km 23+000 - km 24+000.</i> | 46 |
| <i>Tabla N° 2.12. Tabla de Factores de Corrección por Estacionalidad.</i> | 46 |
| <i>Tabla N° 2.13. Tabla de Cálculo de Deflexiones Corregidas por Estacionalidad, km 23+000 - km 24+000.</i> | 47 |
| <i>Tabla N° 2.14. Valor de "t" y probabilidad de ocurrencia de $D > D_c$</i> | 49 |
| <i>Tabla N° 2.15. Características del Pavimento de acuerdo al Tipo de Deflexión.</i> | 53 |
| <i>Tabla N° 2.16. Criterios para la Evaluación Estructural de Pavimentos.</i> | 55 |
| <i>Tabla N° 3.01. Formato de toma de datos de Campo</i> | 60 |
| <i>Tabla N° 4.01. Unidades de Muestra a Evaluar.</i> | 63 |
| <i>Tabla N° 4.02. Lecturas de las diferentes Unidades Evaluadas.</i> | 66 |
| <i>Tabla N° 4.03. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-01... 67</i> | 67 |
| <i>Tabla N° 4.04. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-02... 68</i> | 68 |
| <i>Tabla N° 4.05. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-03... 69</i> | 69 |
| <i>Tabla N° 4.06. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-04... 70</i> | 70 |
| <i>Tabla N° 4.07. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-05... 71</i> | 71 |
| <i>Tabla N° 4.08. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-06... 72</i> | 72 |
| <i>Tabla N° 4.09. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-07... 73</i> | 73 |
| <i>Tabla N° 4.10. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-08... 74</i> | 74 |

| | |
|--|-----|
| <i>Tabla N° 4.11. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-09...</i> | 75 |
| <i>Tabla N° 4.12. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-10...</i> | 76 |
| <i>Tabla N° 4.13. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-11...</i> | 77 |
| <i>Tabla N° 4.14. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-12...</i> | 78 |
| <i>Tabla N° 4.15. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-13...</i> | 79 |
| <i>Tabla N° 4.16. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-14...</i> | 80 |
| <i>Tabla N° 4.17. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-15...</i> | 81 |
| <i>Tabla N° 4.18. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-16...</i> | 82 |
| <i>Tabla N° 4.19. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-17...</i> | 83 |
| <i>Tabla N° 4.20. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-18...</i> | 84 |
| <i>Tabla N° 4.21. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-19...</i> | 85 |
| <i>Tabla N° 4.22. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-20...</i> | 86 |
| <i>Tabla N° 4.23. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-21...</i> | 87 |
| <i>Tabla N° 4.24. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-22...</i> | 88 |
| <i>Tabla N° 4.25. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-23...</i> | 89 |
| <i>Tabla N° 4.26. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-24...</i> | 90 |
| <i>Tabla N° 4.27. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-25...</i> | 91 |
| <i>Tabla N° 4.28. Resumen de Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la Carretera San Pablo – San Miguel, Tramo Sunuden – San Miguel.</i> | 92 |
| <i>Tabla N° 4.29. Resumen de Evaluación de las Deflexiones y radio de curvatura de la Carretera San Pablo – San Miguel, Tramo Sunuden – San Miguel.</i> | 94 |
| <i>Tabla N° A2.01. Conteo vehicular en la carretera Sunuden - San Miguel.</i> | 109 |
| <i>Tabla N° A2.02. Clasificación diaria del tránsito.</i> | 110 |
| <i>Tabla N° A2.03. Factor equivalencia.</i> | 111 |
| <i>Tabla N° A2.04. Tabla de pesos y medidas de vehículos.</i> | 112 |
| <i>Tabla N° A2.05. Cálculo del número de ejes por día.</i> | 113 |
| <i>Tabla N° A2.06. Cálculo del número de EALS en el carril de estudio.</i> | 113 |
| <i>Tabla N° A3.01. Pesos retenidos por tamiz.</i> | 117 |
| <i>Tabla N° A3.02. Análisis granulométrico.</i> | 117 |
| <i>Tabla N° A3.03. Limite líquido.</i> | 119 |
| <i>Tabla N° A3.04. Sistema AASHTO de clasificación de suelos.</i> | 123 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 2.01. Diferentes tipos de pavimento, (a) Pavimento flexible, (b) Pavimento rígido, (c) Pavimento articulado, (d) Afirmado.</i> | <i>8</i> |
| <i>Figura 2.02. Esquema típico del paquete estructural de un pavimento flexible</i> | <i>9</i> |
| <i>Figura 2.03. Distribución e incremento de esfuerzos de un pavimento flexible.</i> | <i>14</i> |
| <i>Figura 2.04 Distribución de esfuerzos en un pavimento flexible</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 2.05 Deformaciones en un pavimento flexible</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 2.06 Curva esfuerzo – deformación.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 2.07. Pérdida de serviciabilidad en un pavimento flexible.</i> | <i>17</i> |
| <i>Figura 2.08. Falla funcional en un pavimento flexible.</i> | <i>18</i> |
| <i>Figura 2.09. Falla estructural en un pavimento flexible.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Figura 2.10. Resultados de una evaluación estructural.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Figura 2.11. Comparación de la distribución de cargas en pavimentos.</i> | <i>23</i> |
| <i>Figura 2.12. Modelo de comportamiento Hogg.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 2.13. Métodos directos de auscultación (a) Extracción de núcleos, (b) Calicatas</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 2.14. Esquema ideal del comportamiento del cuenco de deflexiones</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 2.15. Procedimiento en campo de uso del equipo viga Benkelman.</i> | <i>31</i> |
| <i>Figura 2.16. Deflectograma para evaluar el estado estructural de la vía.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 2.17. Deflectómetro de impacto (FWD).</i> | <i>33</i> |
| <i>Figura 2.18. Esquema viga Benkelman.</i> | <i>34</i> |
| <i>Figura 2.19. Principio de uso de viga Benkelman.</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 2.20. Marcado de la carretera, para la toma de medidas.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 2.21. Ubicación del centro de gravedad del eje posterior.</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 2.22. Alineamiento del extremo de la viga Benkelman con el centro de las llantas.</i> | <i>39</i> |

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 2.23. División de la viga Benkelman en secciones de 25cm, para la toma de medidas.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 2.24. a. Posición inicial (Do = Deflexión máxima).</i> | <i>41</i> |
| <i>Figura 2.24. b. Posición a 25cm (D₂₅).</i> | <i>42</i> |
| <i>Figura 2.24. c. Posición final (D = 0).</i> | <i>42</i> |
| <i>Figura 2.25. Deformada del pavimento y parámetros de comparación.</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 2.26. Deflexión tipo I, curva extensa poco profunda.</i> | <i>51</i> |
| <i>Figura 2.27. Deflexión tipo II, curva extensa profunda.</i> | <i>52</i> |
| <i>Figura 2.28. Deflexión tipo III, curva corta poco profunda.</i> | <i>52</i> |
| <i>Figura 2.29. Deflexión tipo IV, curva corta profunda.</i> | <i>52</i> |
| <i>Figura 3.01. Estructura del pavimento en estudio</i> | <i>57</i> |
| <i>Figura 3.02. Odómetro manual.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Figura 3.03. Viga Benkelman.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figura 3.04. Camión para ensayo.</i> | <i>59</i> |
| <i>Figura 4.01. Porcentaje de unidades de muestra con un comportamiento de subrasante bueno o Malo, de la Carretera San Pablo – San Miguel, Tramo Sunuden – San Miguel.</i> | <i>95</i> |
| <i>Figura 4.02. Porcentaje de unidades de muestra con un comportamiento de pavimento regular o malo, de la carretera San Pablo – San Miguel, tramo Sunuden – San Miguel.</i> | <i>96</i> |
| <i>Figura 4.03. Porcentaje de unidades de muestra con una calidad estructural de pavimento bueno, regular o malo, de la carretera San Pablo – San Miguel, tramo Sunuden – San Miguel.</i> | <i>97</i> |
| <i>Figura 4.04. Deflectograma km 23+000 - km 28+000 de la carretera San Pablo – San Miguel, tramo Sunuden – San Miguel.</i> | <i>98</i> |
| <i>Figura 5.01. Porcentaje de unidades de muestra con estado de pavimento y estado de subrasante en la carretera San Pablo – San Miguel, tramo Sunuden – San Miguel.</i> | <i>99</i> |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura A3.01. Muestra secada en el Horno</i> | 116 |
| <i>Figura A3.02. Peso de muestra inicial</i> | 116 |
| <i>Figura A3.03. Lavado de muestra</i> | 116 |
| <i>Figura A3.04. Curva granulométrica</i> | 118 |
| <i>Figura A3.05. Muestra a ensayar en la copa Casagrande</i> | 119 |
| <i>Figura A3.06. Limite líquido</i> | 119 |
| <i>Figura A5.01. Vista de la Estructura del Pavimento en Estudio</i> | 132 |
| <i>Figura A5.02. Toma de muestra de la Subrasante, para Estudio de Suelos</i> | 132 |
| <i>Figura A5.03. Toma de medida de la Carpeta Asfáltica</i> | 133 |
| <i>Figura A5.04. Base Granular Mejorada con Asfalto</i> | 133 |
| <i>Figura A5.05. Calibración de la Viga Benkelman, para proceder a la toma de Deflexiones</i> | 134 |
| <i>Figura A5.06. Medida de la Temperatura del Pavimento</i> | 134 |
| <i>Figura A5.07. Toma de la Unidad de Muestra U-25 – Km 28+000</i> | 135 |
| <i>Figura A5.08. Vista de la Unidad de Muestra U-19 – Km 26+700</i> | 135 |
| <i>Figura A5.09. Vista de la Unidad de Muestra U-15 – Km 25+900</i> | 136 |
| <i>Figura A5.10. Toma de la Unidad de Muestra U-01 – Km 23+000</i> | 136 |

ÍNDICE DE FORMULAS

| | |
|--|---------|
| 1. Rigidez a la flexión de la placa | pág. 25 |
| 2. Longitud característica | pág. 25 |
| 3. Cálculo de la deformación en la superficie | pág. 25 |
| 4. Cálculo de φ de la deformación en la superficie | pág. 25 |
| 5. Cálculo de la deflexión vertical | pág. 26 |
| 6. Formula de corrección por temperatura | pág. 41 |
| 7. Formula de radio de curvatura | pág. 44 |
| 8. Formula de deflexión media | pág. 45 |
| 9. Formula de desviación estándar | pág. 45 |
| 10. Formula de coeficiente de variación | pág. 45 |
| 11. Formula de deflexión característica | pág. 45 |
| 12. Formula de deflexión admisible | pág. 46 |
| 13. Formula de deflexión crítica | pág. 47 |

LISTA DE SIGLAS Y DE SÍMBOLOS

SIGLAS

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

SÍMBOLOS

| | |
|------|---|
| Do | Deflexión máxima |
| Dc | Deflexión crítica |
| Dt | Deflexión medida a la temperatura del pavimento |
| Dcr | Deflexión admisible inicial |
| Dp | Deflexión promedio |
| Dadm | Deflexión admisible |
| Cv | Coefficiente de variación |

| | |
|----|---|
| E | Módulo de elasticidad de un material cualquiera |
| E1 | Módulo de elasticidad del pavimento |
| Eo | Módulo de elasticidad de la subrasante |
| P | Carga |
| Fc | Factor de crecimiento |
| Fe | Factor de equivalencia |
| Rc | Radio de curvatura |

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo determinar el comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera San Miguel – San Pablo, tramo San Miguel – Sunuden, haciendo uso del análisis deflectométrico. Cinco mil metros lineales de pavimento han sido estudiados para identificar el comportamiento estructural actual en el que se encuentra dicho pavimento, para lo cual se tomaron 25 muestras, ubicadas a lo largo de la vía en estudio.

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

Se determinó el comportamiento estructural de las capas del Pavimento flexible de la carretera San Miguel – San Pablo, tramo San Miguel – Sunuden, mediante el análisis deflectométrico. Indicándonos que dicha carretera presenta actualmente un mal comportamiento estructural. Debido a que la deflexión promedio (137.12×10^{-2} mm) es mayor a la deflexión admisible (108×10^{-2} mm). Por lo que no se garantiza una estructura de comportamiento satisfactorio.

Finalmente se concluye que el análisis deflectométrico de una vía, nos indica cual es el comportamiento estructural de dicha vía, en cualquier punto de su vida útil.

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

ABSTRACT

The present thesis has like aim determine the structural behaviour of the flexible paving of the road San Miguel – Saint Pablo, stretch San Miguel – Sunuden, doing use of the analysis deflectométrico. Five thousand linear metres of paving have been studied to identify the current structural behaviour in which it finds said paving, for which took 25 samples, situated along the road in study.

For the essays of deflectometría used a truck of two axes, whose back axis weight 18,000 pounds, and the Beam Benkelman of double arm through which would register the deflexiones present in the paving in study, for afterwards be analysed, following the parameters stipulated by the CONREVIAL.

determinOr the structural behaviour of the layers of the flexible Paving of thec arretera San Miguel – Saint Pablo, tbouquet San Miguel – Sunuden, by means of the analysis deflectométrico. Indicating us that said road presents at present a bad structural behaviour. Due to the fact that the deflexión average (137.12×10^{-2} mm) is greater to the deflexión admissible (108×10^{-2} mm). By what does not guarantee a structure of satisfactory behaviour.

Finally it concludes that the analysis deflectométrico of a road, indicates us cual is the structural behaviour of said road, in any point of his useful life.

Keywords: Paving, Subrasante, Beam Benkelman, Deflexión admissible, Irradiate of curvature.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos antiguos, la necesidad de contar con un sistema de carreteras que conecten a poblaciones de una región con otra, ha sido fundamental en el desarrollo de una región. Por lo tanto, las redes viales de un país son las que promueven un verdadero desarrollo social, cultural y económico de sus habitantes. Sin embargo conforme al paso del tiempo, el crecimiento del parque automotor tanto en número como en carga, combinado con los pavimentos que han sido diseñados para soportar condiciones de esfuerzo menores, ha provocado que exista un alto grado de deterioro de estas mismas.

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

El presente trabajo de investigación consiste en la determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Sunuden – San Miguel de Pallaques, mediante el análisis deflectométrico de las capas del pavimento flexible cimentado sobre una sub-rasante constituida por suelo limoso y arcilloso¹.

El pavimento asfáltico de la carretera Sunuden-San Miguel de Pallaques, se encuentra en proceso de colapso estructural debido a causas asociadas a su uso, diseño y proceso constructivo llegando a afectar a la población del área de influencia de la carretera Sunuden-San miguel de Pallaques. Es así que surge la necesidad de conocer el comportamiento estructural actual del pavimento de la carretera Sunuden-San Miguel a través del análisis deflectométrico.

El análisis deflectométrico de las capas del pavimento flexible de la carretera San Pablo – San Miguel, tramo Sunuden – San Miguel, determina el comportamiento

¹ Anexo 3 – Estudio de Suelos de la Carretera Sunuden – San Miguel.

estructural del pavimento, frente a las cargas impuestas en cualquier punto de su vida útil.

Mediante la determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Sunuden – San Miguel de Pallaques, se podrá tomar medidas de reparación del paquete estructural del pavimento en estudio, con el fin de mejorar la serviciabilidad presente de dicha vía.

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

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

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

En el cuarto capítulo, se presentan las hojas de registro y cálculo de las deflexiones para las muestras obtenidas en el campo, así como el resumen de evaluación de las deflexiones y radio de curvatura de la carretera en estudio.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La experimentación, por muchos años, en evaluación de suelos y pavimentos, mediante la medición y análisis de deflexiones con diferentes metodologías han desarrollado correlaciones entre las propiedades medidas y los parámetros elásticos del sistema suelo-pavimento, lo que ha permitido el desarrollo de un método simple y rápido para ser aplicado en obra con la finalidad de evaluar la capacidad de soporte de los suelos (Castro 2003).

La evaluación estructural de pavimentos determina la capacidad portante del sistema pavimento-Subrasante en una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al fin de su vida útil o cuando el pavimento va a cambiar su función. La información de deflexiones obtenidas mediante el empleo de la viga de Benkelman nos servirá para realizar un modelo matemático, mediante el cual se va a determinar la capacidad portante de un modelo estructural de pavimento (Castro 2003).

El pavimento asfáltico de la carretera Sunuden-San Miguel de Pallaques, se encuentra en proceso de colapso estructural debido a causas asociadas a su uso, diseño y proceso constructivo llegando a afectar a la población del área de influencia de la carretera Sunuden-San Miguel de Pallaques, por motivos de comodidad seguridad y funcionalidad, estando estas fallas presentes en toda la vía. Es así que surge la necesidad de conocer el comportamiento estructural actual del pavimento de la carretera Sunuden-San Miguel a través del análisis deflectométrico.

En este contexto, la presente investigación se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento., comparados con los establecidos a la normativa establecida ASTM D4695, cuyos resultados podrían ser utilizados para que las autoridades implanten decisiones de política y de gestión en mejora de un problema de evaluación estructural.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es el comportamiento estructural actual del Pavimento flexible de la Carretera San Pablo - San Miguel, Tramo Sunuden - San Miguel?

1.4. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

El pavimento flexible de la carretera San Pablo – San Miguel, tramo Sunuden – San Miguel, presenta actualmente un comportamiento estructural de mala calidad.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La importancia radica en que la carretera San Pablo - San Miguel, tramo Sunuden - San Miguel, es la principal entrada hacia la ciudad de San Miguel, por la cual se transporta gran parte de su comercio y turismo. Notándose actualmente un alto grado de deterioro en su carpeta asfáltica. Y ya que actualmente no se cuenta con un estudio del comportamiento estructural del pavimento flexible de dicha carretera, surge la necesidad de realizar la determinación del comportamiento estructural de la carretera San Pablo - San Miguel, tramo Sunuden - San Miguel.

Es por esto que el presente trabajo de investigación busca proveer de datos actuales del comportamiento estructural de la carretera San Pablo - San Miguel, tramo Sunuden - San Miguel, para posteriormente realizar mantenimientos o rehabilitaciones en torno a su carpeta estructural, con el fin de brindar una mejor transitabilidad tanto del transporte de carga como de pasajeros.

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

1.6. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar cuál es el comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera San Miguel – San Pablo, tramo San Miguel - Sunuden.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el análisis deflectométrico del pavimento flexible de la carretera San Miguel – San Pablo, tramo San Miguel – Sunuden.
- Determinar valores admisibles de deflexión del pavimento flexible de la carretera San Miguel – San Pablo, tramo San Miguel – Sunuden.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

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

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

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

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

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

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

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

2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES

Ignacio (2003) En la Universidad Nacional de Cajamarca, en la Tesis “Análisis Deflectométrico de las capas del pavimento flexible con Subrasante de suelo arenoso en la Panamericana Norte km 355+500 al 375+500”, el análisis se realizó con los ensayos de deflexiones que se tomaron en la carpeta de rodadura, los que dan la idea de cómo se comporta el pavimento y la Subrasante mediante la interpretación de las curvas de deflexiones obtenidas, estos se procesaron en gabinete, obteniendo una buena capacidad estructural en todo el tramo de estudio. Además se controló las deflexiones en todas las capas del paquete estructural y

Subrasante donde se construyó el pavimento flexible con la finalidad de evaluar puntos que noten inestabilidad. Así como también se determinó cualitativamente la capacidad estructural del pavimento flexible mediante experiencia recopilada en obra y con el apoyo de fórmulas empíricas sustentados por el teorema del Hogg.

2.2. BASES TEÓRICAS

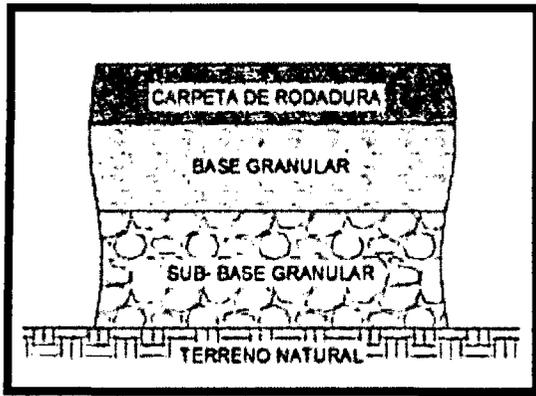
2.2.1. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO

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

De acuerdo a la ingeniería, el pavimento es un elemento estructural que se encuentra apoyado en toda su superficie sobre el terreno de fundación llamado Subrasante. Esta capa debe estar preparada para soportar un sistema de capas de espesores diferentes, denominado paquete estructural, diseñado para soportar cargas externas durante un determinado periodo de tiempo. Ver figura 2.01.

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

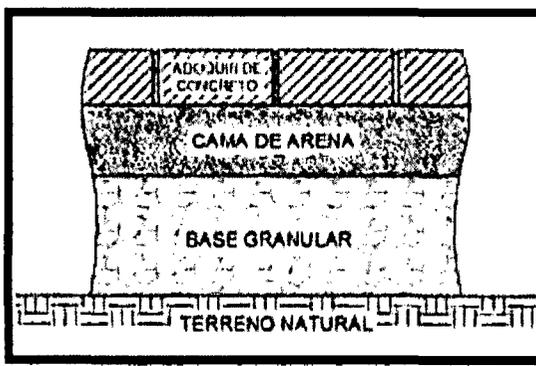
Las diferentes capas de material seleccionado que conforman el paquete estructural, reciben directamente las cargas de tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada. Es por ello que todo pavimento deberá presentar la resistencia adecuada para soportar los esfuerzos destructivos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



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.01. Diferentes tipos de pavimento, (a) Pavimento flexible, (b) Pavimento rígido, (c) Pavimento articulado, (d) Afirmado.

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

2.2.2. PAVIMENTO FLEXIBLE

El trabajo de la presente tesis está referido a pavimentos flexibles, por lo que se explicara a detalle las capas que lo constituyen y su comportamiento frente a sollicitaciones externas.

Los pavimentos flexibles están constituidos por las siguientes capas: carpeta asfáltica, base, subbase y Subrasante. A continuación se explica a detalle cada uno de estos elementos.

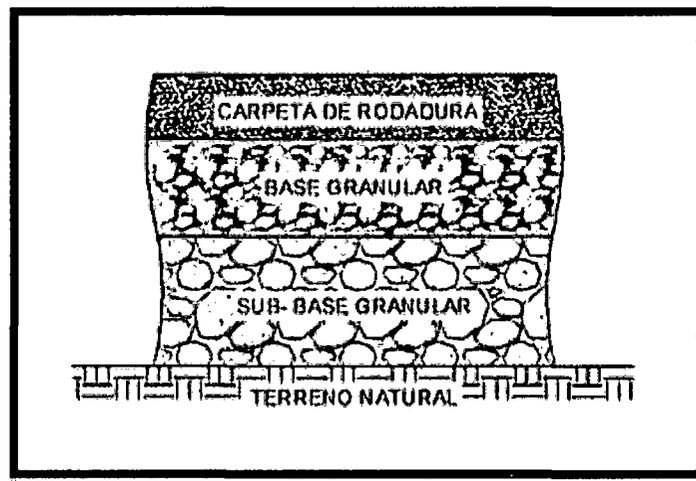


Figura 2.02. Esquema típico del paquete estructural de un pavimento flexible

A. Carpeta Asfáltica

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

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

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

Tabla N° 2.01 Tipo de carpeta asfáltica según intensidad del tránsito

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

Fuente: (Reyes Lizcano, 2003)

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

B. Base

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

La base puede estar constituida principalmente por material granular, como piedra triturada y mezcla natural de agregado y suelo; pero también puede estar conformada con cemento Portland, cal o materiales bituminosos, recibiendo el nombre de base estabilizada. Estas deben tener la suficiente resistencia para recibir la carga de la superficie y transmitirla hacia los niveles inferiores del paquete estructural.

El material de la Base Granular deberá cumplir además con las siguientes características físico-mecánicas y químicas que se indican en las Tablas N° 2.2, N° 2.3 y N° 2.4.

Tabla N° 2.02. Características Físico-mecánicas.

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

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

Fuente: (EG-2013)

Tabla N° 2.03. Requerimientos Agregado Grueso.

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

Fuente: (EG-2013)

Tabla N° 2.04. Requerimientos Agregado Fino. .

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

Fuente: (EG-2013)

C. Subbase

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

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

El material que conforma la Subbase deberá cumplir los requisitos de calidad indicados en la Tabla N°2.5.

Tabla N° 2.05. Requerimientos de Ensayos Especiales.

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

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

Fuente: (EG-2013)

D. Subrasante

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

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

Tabla N° 2.06. Categorías de Subrasante.

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

Fuente: (MTC-2013)

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

En un pavimento flexible, la distribución de la carga está determinada por las características del sistema de capas que lo conforman. Las capas de mejor calidad están cerca a la superficie donde los esfuerzos son mayores, y estos esfuerzos se distribuyen de

mayor a menor, a medida que se va profundizando hacia los niveles inferiores. Ver figura 2.03.

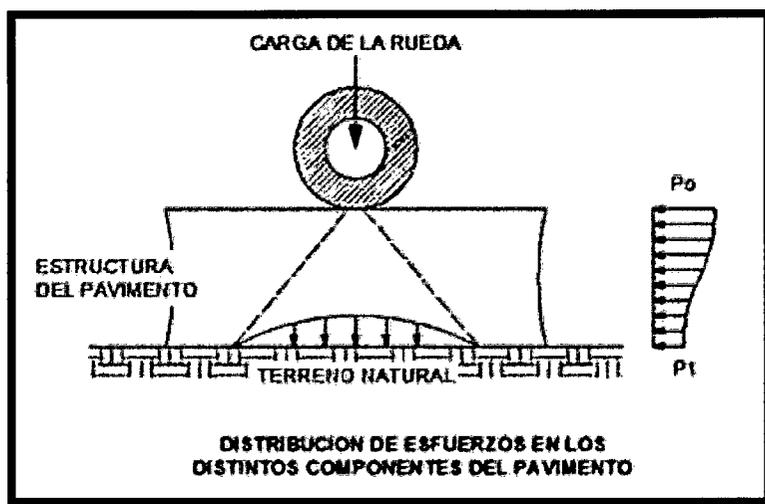


Figura 2.03. Distribución e incremento de esfuerzos de un pavimento flexible.

2.2.3. ESFUERZOS PRODUCIDOS EN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO ASFALTICO

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

La llanta no solo genera esfuerzos verticales sino también esfuerzos horizontales. En una estructura típica de pavimento (carpeta asfáltica, base y subbase granular) los esfuerzos horizontales se disipan a través de la carpeta asfáltica, pasando de un valor positivo en la superficie a uno negativo en su fibra interior. Los esfuerzos así generados producen fisuras que luego se reflejarán en la superficie. La figura 2.04 muestra la distribución de esfuerzos horizontales (σ_h) y verticales (σ_v) de pavimentos típicos.

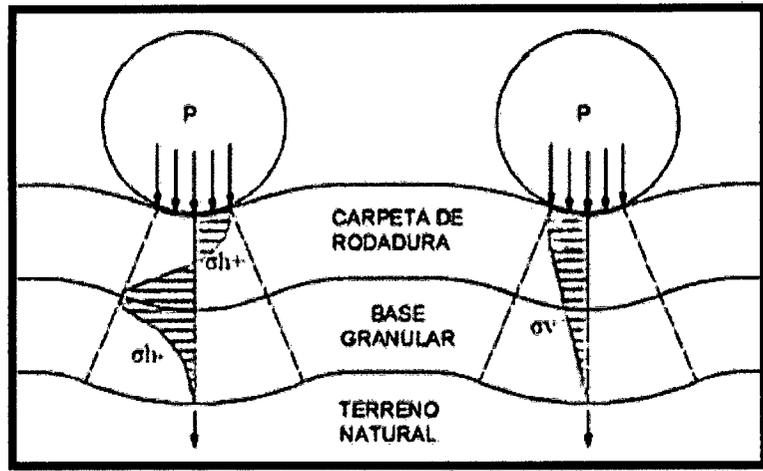


Figura 2.04 Distribución de esfuerzos en un pavimento flexible

Como se observa en la figura 2.04, los esfuerzos son reducidos a nivel de base granular, la carpeta de rodadura contribuye en la función estructural cuando posee un espesor mayor de 3 pulgadas, en menores espesores solo contribuye como una capa protectora del pavimento la cual distribuye los esfuerzos a la base, sin disminuirlos.

En la publicación “Análisis deformacional en el diseño de pavimentos asfálticos”, se modela una estructura típica conformada por carpeta asfáltica, base y subbase granulares, y suelo compactado, sobre fundación débil y la alternativa de resolver el problema incrementando el espesor de la carpeta asfáltica. Las condiciones de análisis fueron las mismas, solo se variaron el espesor de la carpeta asfáltica, las cuales fueron de 2, 4 y 6 pulgadas. Llegando a la conclusión que al incrementar el espesor de la carpeta no reduce las deformaciones por tracción, la mejor alternativa es minimizar las deformaciones plásticas a nivel de fundación mediante la estabilización.

Las principales fallas que se producen en el pavimento están asociadas a las deformaciones excesivas a nivel de la sub rasante, reflejando el comportamiento del terreno de fundación y la deformación por tracción, asociado al agrietamiento, figura 2.05

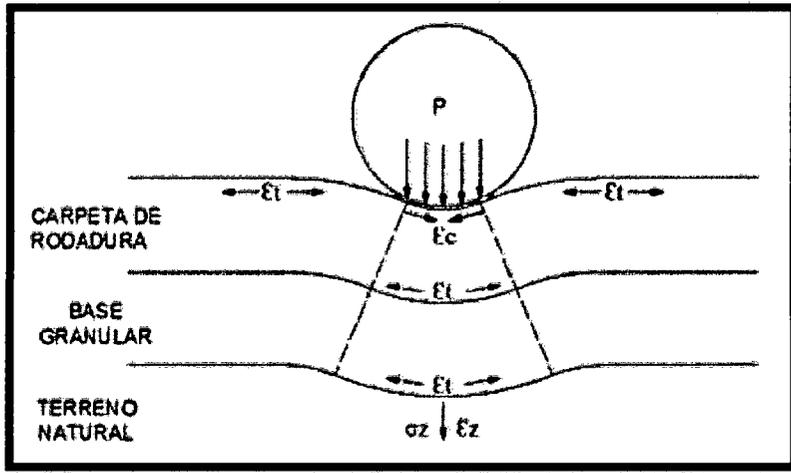


Figura 2.05 Deformaciones en un pavimento flexible

La figura 2.06, demuestra correlación existente entre las deformaciones y esfuerzos producidos en el pavimento, indicándonos que cada material tiene un módulo de elasticidad propio, lo que no indica que a mayor deflexión del pavimento, se sufrirá mayores esfuerzos en el pavimento.

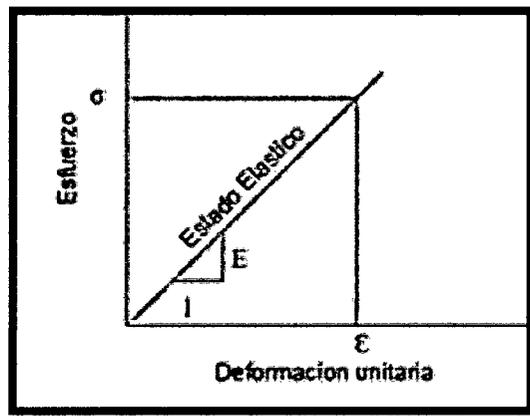


Figura 2.06 Curva esfuerzo – deformación

2.2.4. TIPOS DE FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

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

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

Dependiendo de su origen las fallas pueden ser clasificadas como:

Falla funcional:

Tomando en cuenta que el índice de servicio se refiere únicamente a las condiciones de la superficie de rodamiento; la estructura funcional en sí, nos proporcionara un tránsito cómodo a los usuarios y una superficie de rodamiento adecuada a las necesidades de este, en su determinación o apreciación no intervendrán factores como diseño geométrico, estado de acotamientos, señalamiento.

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

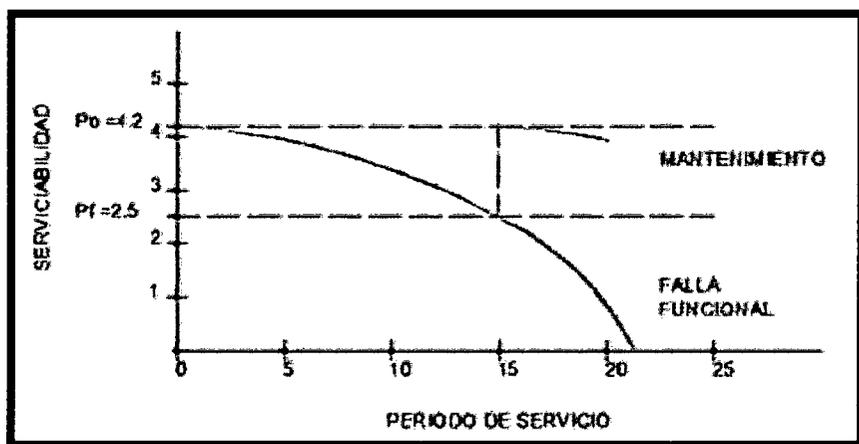


Figura 2.07. Pérdida de serviciabilidad en un pavimento flexible.

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

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

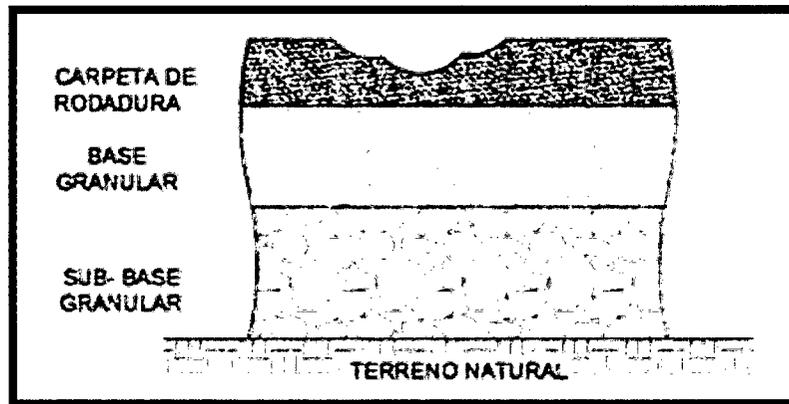


Figura 2.08. Falla funcional en un pavimento flexible.

Falla estructural:

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

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

- Cuando la capacidad de deformación – recuperación de los materiales que conforman la estructura de pavimento es “excedida más allá del valor que determinan las deformaciones recuperables por elasticidad instantánea y

retardada, desarrollándose deformaciones permanentes (ahuellamiento) en cada aplicación de las cargas, las que se acumulan, modificando los perfiles de la calzada hasta valores que resultan intolerables para la comodidad, seguridad y rapidez del tránsito y que pueden provocar el colapso de la estructura”

- Cuando las deformaciones recuperables son elevadas, los materiales y en particular las capas asfálticas sufren el fenómeno denominado fatiga cuando el número de aplicaciones de las cargas pesadas es elevado, que se traduce en reducción de sus características mecánicas. En este caso la deformación horizontal por tracción en la parte inferior de las capas asfálticas al flexionar la estructura, puede exceder el límite crítico y se llega a la iniciación del proceso de fisuramiento”

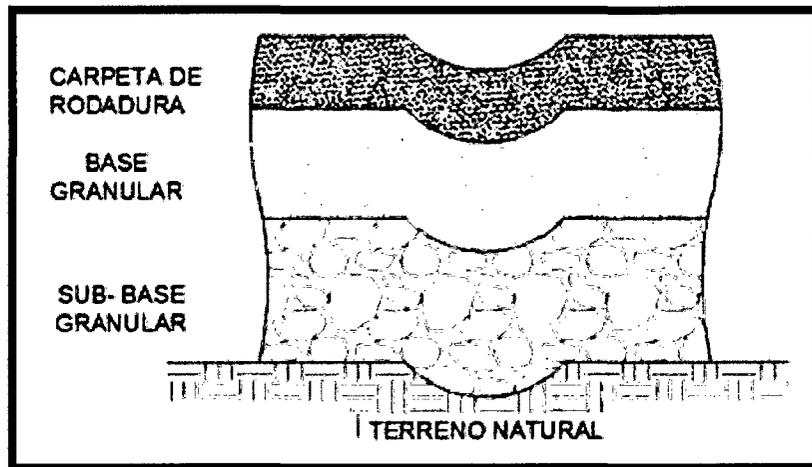


Figura 2.09. Falla estructural en un pavimento flexible.

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

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

- Fallas originadas por la repetición de cargas.
- Fallas ocasionadas por los agentes climatológicos.

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

2.2.5. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

La evaluación estructural de pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad resistente del sistema en una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al fin de su vida útil o cuando el pavimento va a cambiar su función de demanda de tráfico.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Al final, la evaluación estructural puede proveer resultados partiendo de las dos etapas importantes que lo componen como lo son la auscultación estructural y el retrocálculo (Fig. 2.10)

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

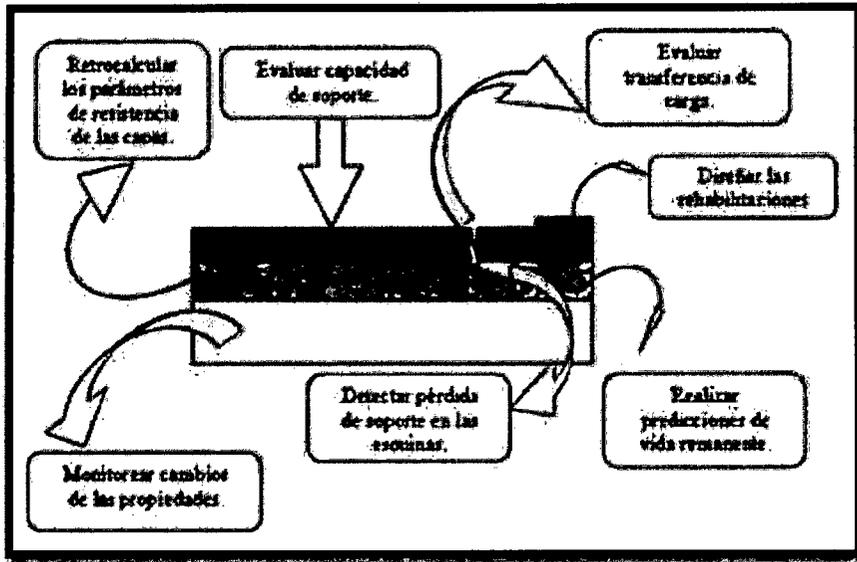


Figura 2.10. Resultados de una evaluación estructural.

2.2.6. SOLICITACIONES PRINCIPALES DE UN PAVIMENTO.

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

2.2.4.1. TRÁNSITO

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

El tránsito está compuesto por diferentes vehículos, de diferentes pesos y número de ejes (ver Anexo 2). Evaluar esta diversidad es un trabajo complejo por tal razón, actualmente algunas metodologías definen la conversión del tránsito existente, proyectado o inducido en un número de ejes equivalente identificado como ESAL's, el cual consiste en el número de repeticiones de carga equivalentes a 8.2 ton. O 18 kips, durante la vida útil del pavimento.

El efecto de las cargas producidas por los vehículos en los pavimentos es la principal causa del deterioro de este, a lo cual se suma el efecto del clima, reduciendo así la capacidad del pavimento. (Ver figura 2.11.)

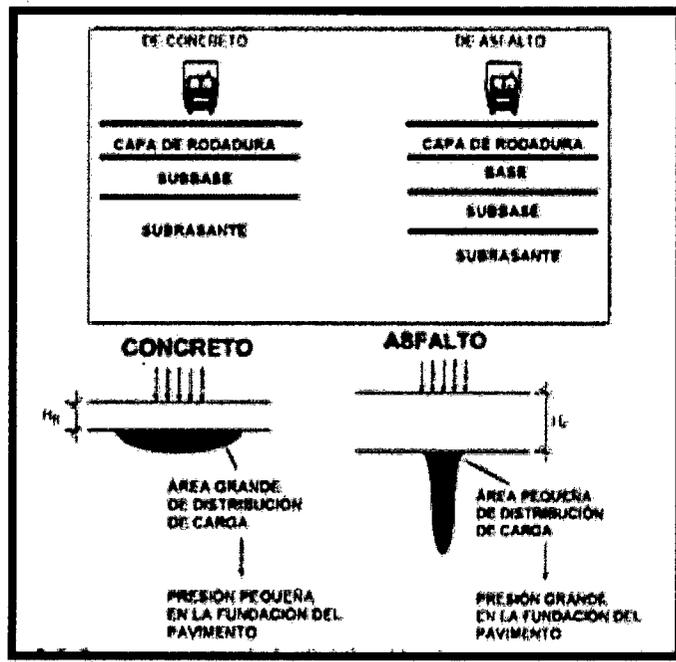


Figura 2.11. Comparación de la distribución de cargas en pavimentos.

2.2.4.2. CLIMA

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

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

2.2.7. MODELOS DE COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO.

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

A. MODELO DE HOGG (1944)

Hogg presentó la solución matemática del modelo que se conoce por su nombre. Este modelo representa al pavimento como una placa delgada con una cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita, sustentada por una capa elástica homogénea e isotrópica, de espesor que puede ser infinito o limitado por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa. La figura 2.12 describe la geometría y los parámetros del modelo de Hogg.

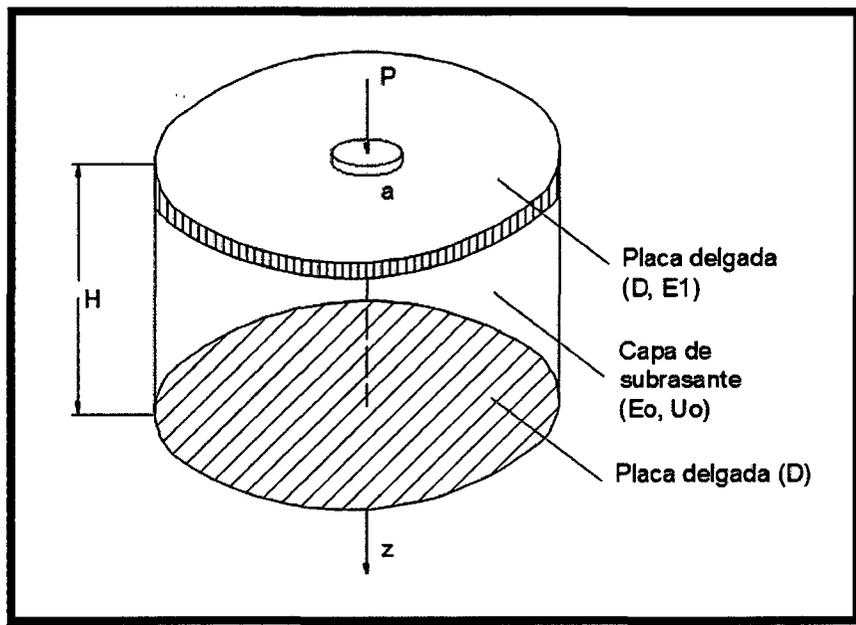


Figura 2.12. Modelo de comportamiento Hogg.

Los parámetros que desarrolla este modelo son los siguientes.

- Rigidez a la flexión de la placa

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

- Longitud característica

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

Donde:

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

Uo : módulo de poisson de la subrasante (adimensional)

H : profundidad del estrato rocoso (cm)

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

$$\Delta_{(z=0,r)} = \left(\frac{(1 + Uo)(3 - 4Uo) * p * a}{2(1 - Uo) * Eo} \right) \int_0^\infty \frac{Jo \left(\frac{m * r}{Lo} \right) * J1 \left(\frac{m * a}{Lo} \right)}{m^4 + m * \varphi * \frac{m * h}{Lo}} dm \dots \dots \dots (3)$$

Donde Uo, Eo, p, Lo, están definidos en la figura 2.12, "r" es la distancia horizontal en la superficie de la placa desde el eje de carga y φ viene dada por la siguiente expresión:

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

B. MODELO DE AHLVIN Y ULERY (1962)

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

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

La determinación de la magnitud de las deflexiones en la subrasante, como resultado de la sollicitación de cargas aplicadas por un eje equivalente de 8.2 toneladas, se efectuó a través de ensayos deflectométricos con la aplicación de la VB directamente sobre la subrasante para el registro de las deflexiones resultantes.

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

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

Donde:

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

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

Tabla N° 2.07. Determinación teórica de deflexiones según la fórmula propuesta por Ahlvin y Ulery.

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

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

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

2.2.8. MÉTODOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL.

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

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

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

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

2.2.6.1. MÉTODOS DIRECTOS DE AUSCULTACIÓN

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

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

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

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

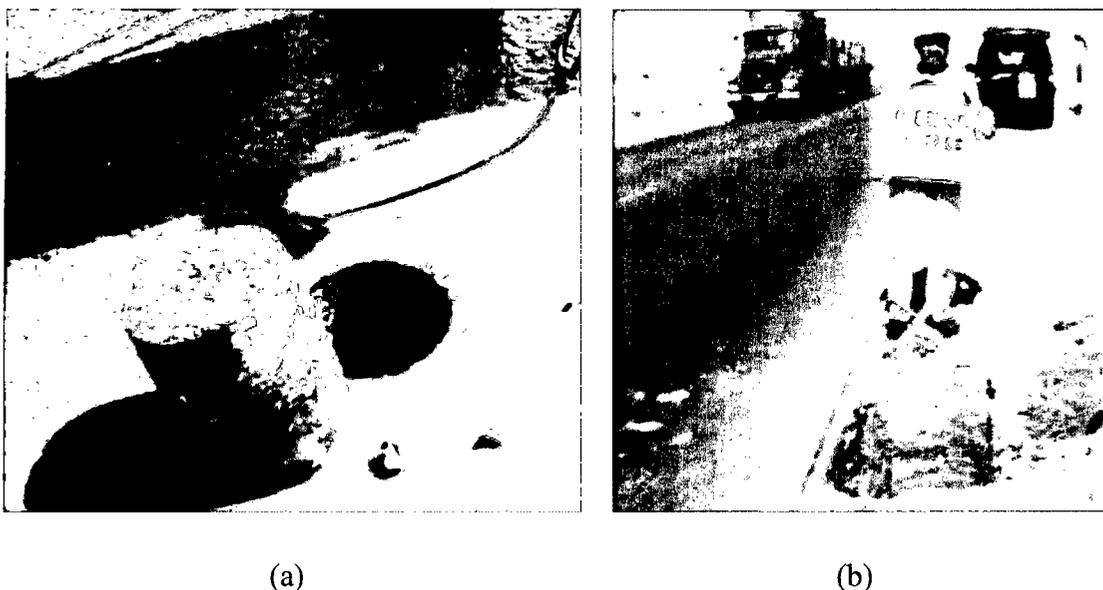


Figura 2.13. Métodos directos de auscultación (a) Extracción de núcleos, (b) Calicatas

2.2.6.2. MÉTODOS INDIRECTOS DE AUSCULTACIÓN ESTRUCTURAL

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

Estos métodos se realizan por medio de metodologías conocidas tales como no destructiva “NDT” (non destructive test), que se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de los pavimentos. Dicha metodología se fundamenta en que la forma y dimensión de la curva de deflexiones encierra una valiosa información acerca de las características estructurales del pavimento y su subrasante, por lo que se puede mencionar que la metodología de evaluación estructural por medio de NDT, es un proceso de diseño inverso (retrocalcula) ya que se utiliza la respuesta del sistema (pavimento-subrasante) para establecer sus características estructurales.

Al definir el término deflexión, lo más acertado sería considerarlo como la medida de la deformación elástica que experimenta un pavimento, al paso de una carga en función del tipo y del estado del pavimento. El cuenco de deflexiones se define como el conjunto de deflexiones que se producen entre el punto de aplicación de la carga en un pavimento y sus alrededores (ver Fig. 2.14)

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

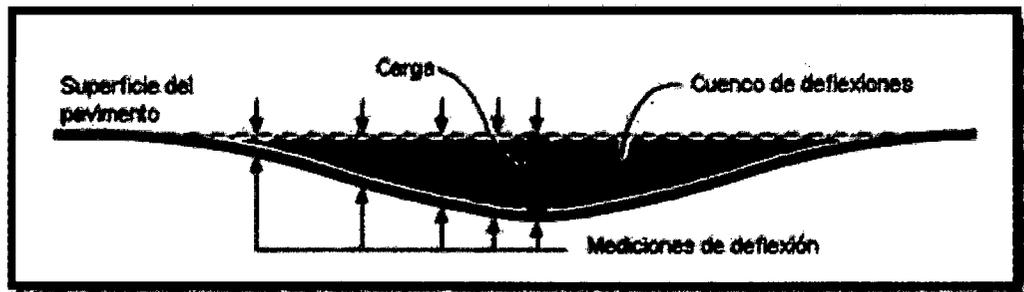


Figura 2.14. Esquema ideal del comportamiento del cuenco de deflexiones

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

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

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

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

A. MEDICIÓN DE DEFLEXIONES POR MEDIO DE CARGAS ESTÁTICAS

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

Los END empleados en el país en los últimos 20 años, se han ejecutado con el deflectógrafo tipo Viga Benkelman según el procedimiento canadiense Canadian-Goad Road Association (coincidente con el Instituto del Asfalto) que determina la deflexión elástica del pavimento. Este equipo determina deformaciones del pavimento frente a las solicitaciones de carga provenientes de un vehículo cargado. La Figura 2.15 muestra las ruedas duales de un eje trasero de un vehículo que transmite una carga de 8.2 toneladas y el equipo Viga Benkelman posicionado para efectuar las mediciones de deformaciones.

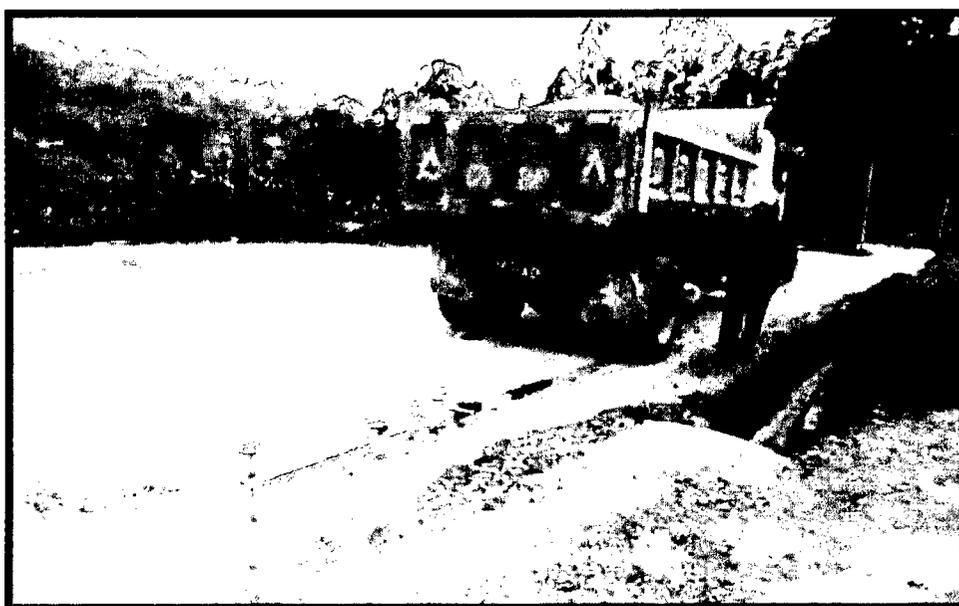


Figura 2.15. Procedimiento en campo de uso del equipo viga Benkelman.

Para los modelos matemáticos, la interpretación de deflexiones que se integran para definir la deformada de la superficie del pavimento, se realiza con una viga Benkelman de brazo simple, de la cual se registran cinco lecturas en el dial de deformación para una sola estación. Los valores se integran atendiendo modelos matemáticos de Hogg. Se establecen módulos de elasticidad de la parte estructural del pavimento y del material de subrasante. Las comparaciones se efectúan hasta llegar a especular la capacidad de soporte de la subrasante o determinar el valor de CBR. Las deflexiones determinadas, deben ser corregidas por temperatura que presente la carpeta asfáltica.

Los resultados de deflexiones y radios de curvatura permiten determinar sectores de comportamiento estructural homogéneo. La figura 2.16 muestra el

deflectograma resultante de graficar las deflexiones máximas obtenidas en cada estación evaluada. La homogeneidad de la gráfica evaluada a partir de la amplitud alcanzada permite determinar sectores de comportamiento similar y de esta manera sectorizar el tramo.



Figura 2.16. Deflectograma para evaluar el estado estructural de la vía.

B. MEDICIÓN DE DEFLEXIÓN POR CARGAS DE IMPACTO

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

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

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

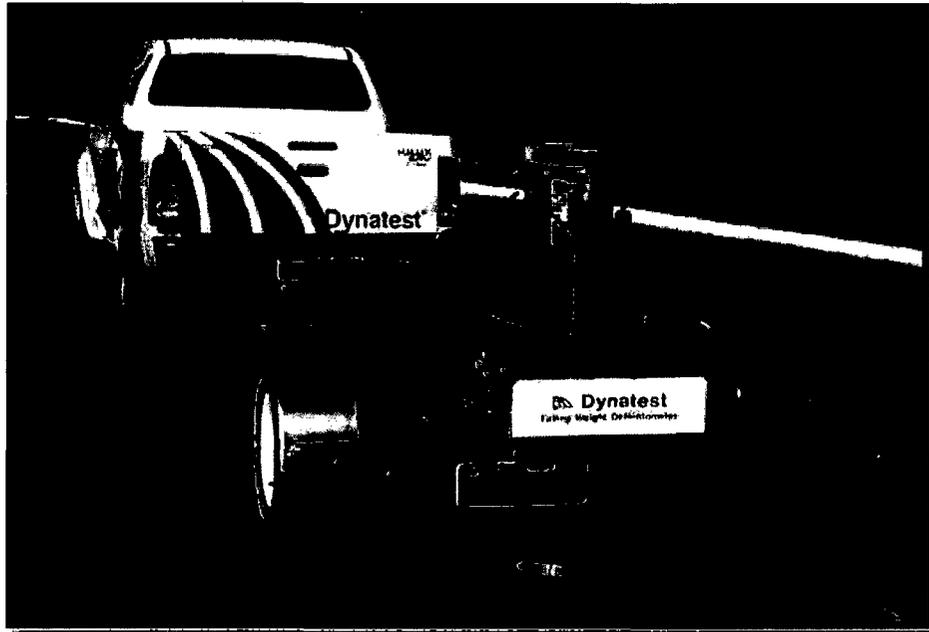


Figura 2.17. Deflectómetro de impacto (FWD).

2.2.9. VIGA BENKELMAN

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

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

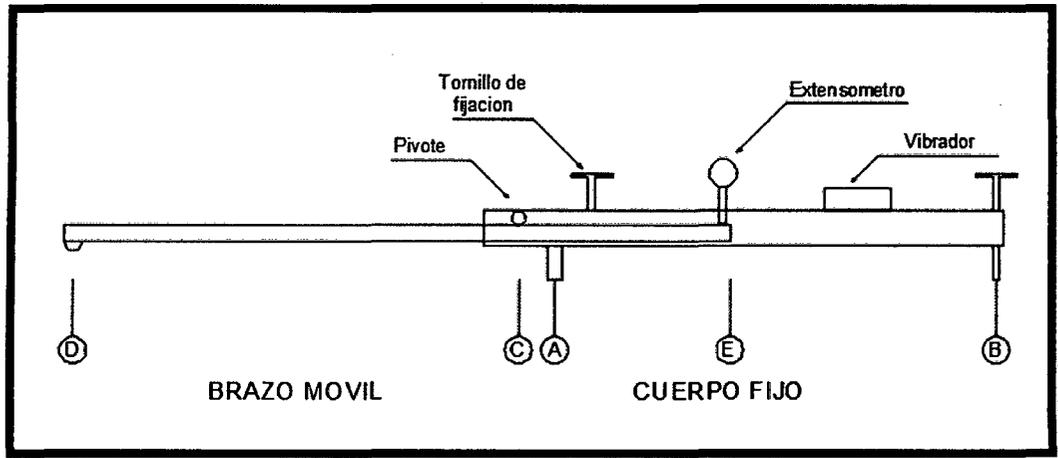


Figura 2.18. Esquema viga Benkelman.

Consiste en un dispositivo sencillo que opera por medio de una palanca suspendida de un bastidor que transmite la deflexión vertical del punto de medida a un comparador. Este equipo debe ser usado con un camión cargado, normalmente con 80 KN en un eje, con llantas duales infladas a una presión de 0.48 a 0.55 Mpa (70 a 80 Psi). Las mediciones se realizan colocando la punta de la viga entre las dos ruedas y midiendo la deflexión cuando el vehículo se retira. Los resultados de las deflexiones se leen en un dial indicador.

El procedimiento de su uso es el siguiente.

El extremo "D" o punta de la viga es de espesor tal que puede ser colocado entre una de las llantas dobles del eje trasero de un camión cargado. Por el peso aplicado se produce una deformación del pavimento, consecuencia de lo cual la punta baja una cierta cantidad, con respecto al nivel descargado de la superficie. Como efecto de dicha acción el brazo "DE" gira en torno al punto fijo "C", con respecto al cuerpo "AB", determinando que el extremo "E" produzca un movimiento vertical en el vástago del extensómetro apoyado en él, generando así una lectura en el dial indicador. Si se retiran luego las llantas cargadas, el punto "D" se recupera en lo que a deformación elástica se refiere y por el mismo mecanismo anterior se genera otra lectura en el dial del extensómetro. La operación expuesta representa el principio de medición con la Viga Benkelman. Lo que se hace después son solo cálculos en base a los datos recogidos. Así, con las lecturas obtenidas es posible determinar cuánto deflecto el pavimento en el lugar subyacente al punto "D" de la viga, durante el

procedimiento descrito. Es de anotar que en realidad lo que se mide es la recuperación del punto “D” al remover la carga (rebote elástico) y no la deformación al colocar esta. Para calcular la deflexión deberá considerarse la geometría de la viga, toda vez que los valores dados por el extensómetro (EE’) no están en escala real sino que dependen de la relación de brazos existentes (fig.2.19)

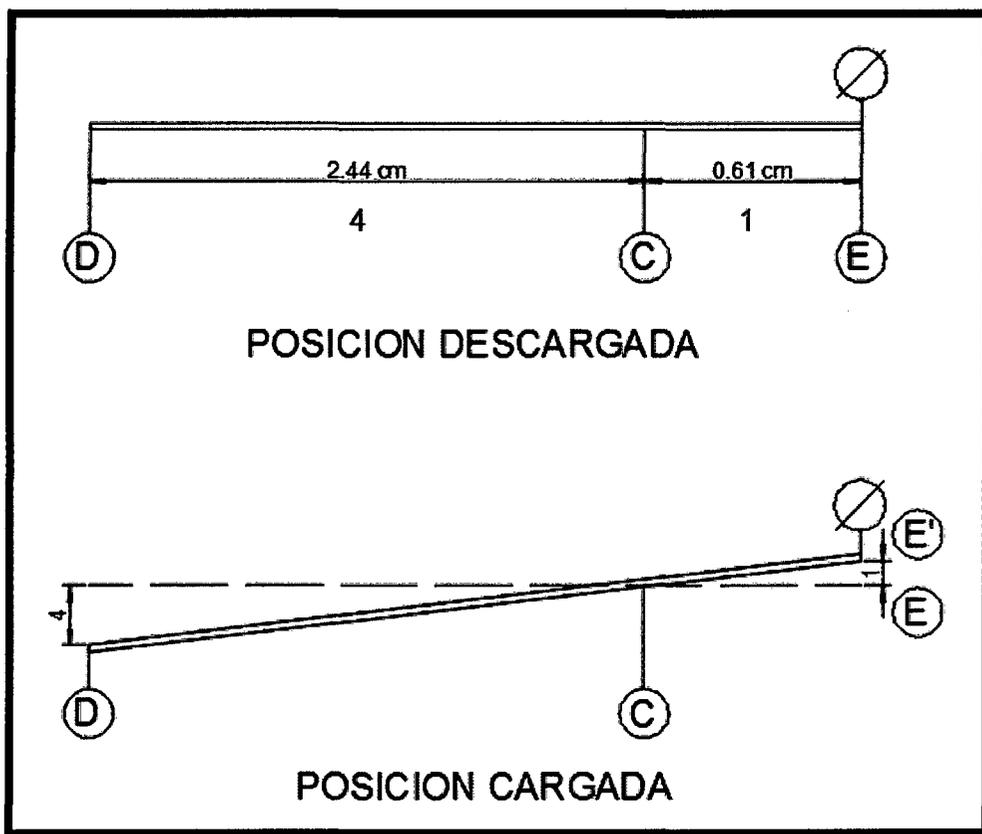


Figura 2.19. Principio de uso de viga Benkelman.

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

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

2.2.10. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Los trabajos de rehabilitación de carreteras, demandan evaluaciones del tipo no destructivas (END), las mismas que durante los últimos años se han desarrollado mediante el empleo de la Viga Benkelman. Esta Viga en algunos casos presenta un solo aguilón o brazo y en otros casos presenta dos de ellos. Se debe tener en cuenta aspectos de suma y en otros casos presenta dos de ellos. Se debe tener en cuenta aspectos de suma importancia como la relación de brazos de palanca de los aguilonos y a la aproximación de lecturas de los diales empleados.

Los END empleando la Viga Benkelman, determina deformaciones del pavimento frente a las sollicitaciones de carga provenientes de un vehículo cargado. En el año 1983, durante los primeros trabajos de rehabilitación en el país, este equipo era considerando obsoleto para la toma de lecturas de deformaciones, pero equipos más sofisticados demandaban costo por encima de los 1000,000 dólares, tal es el caso del equipo Falling Weight Deflectometre (FWD) y que el MTC no podía adquirir en aquel entonces.

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

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

Los cuales se detallan a continuación.

2.2.7.1. PROCEDIMIENTO

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

La carga de ensayos del orden de 18,000 libras (8,200 kg), las proporciona el eje posterior simple de llanta doble de un camión. La presión de inflado de las llantas debe verificarse en 80 psi (5.6 kg/cm²).

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

- I. El punto del pavimento a ser ensayado, deberá ser marcado convenientemente con una línea transversal al camino (ver Fig. 2.20). Sobre dicha línea será localizado el punto de ensayo a una distancia prefijada del borde. Se recomienda utilizar las distancias indicadas en la siguiente tabla (ver Tabla 2.08).

Tabla N° 2.08. Tabla de distancias para ensayos.

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

Fuente: MTC E 1002 - 2000

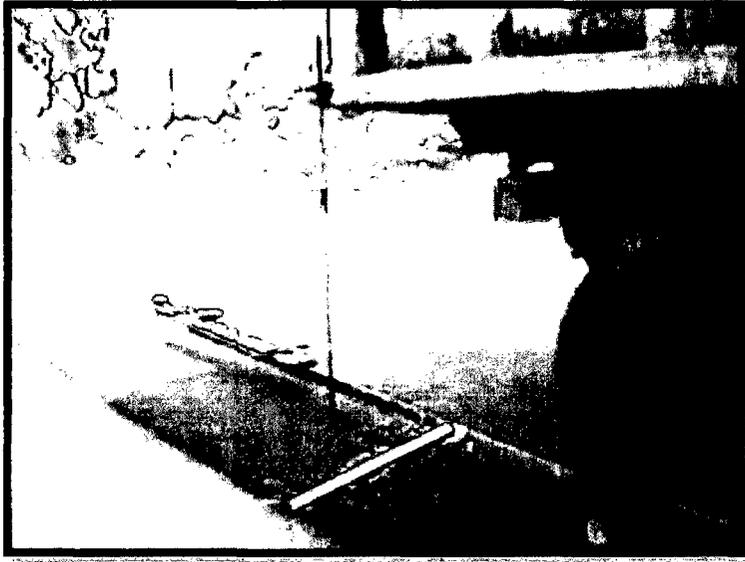


Figura 2.20. Marcado de la carretera, para la toma de medidas.

- II. La rueda dual externa deberá ser colocada sobre el punto seleccionado, quedando este ubicado entre ambas llantas. Para la correcta ubicación de la misma es conveniente colocar en la parte trasera externa del camión una guía vertical en correspondencia con el eje de carga; desplazando suavemente el camión, se hace coincidir la guía vertical con la línea transversal indicada en el paso número I, de modo que simultáneamente el punto que entre ambas llantas de la rueda dual y que coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto (ver Fig. 2.21). para toda esta operación es aceptable una tolerancia en el rango de 3" alrededor del punto.

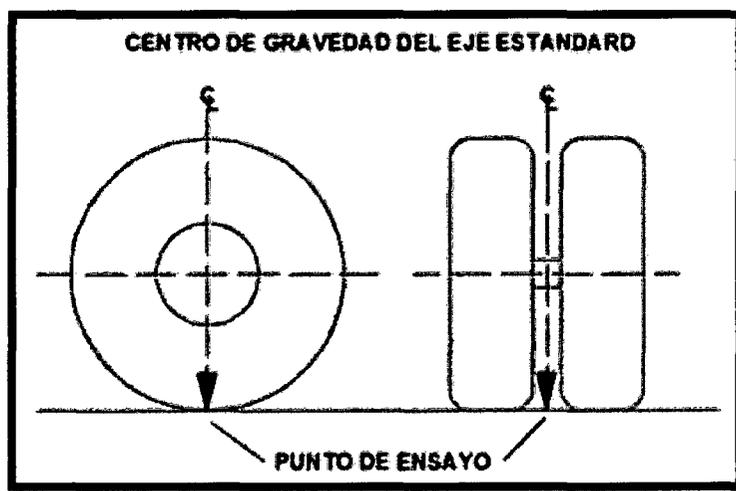


Figura 2.21. Ubicación del centro de gravedad del eje posterior.

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

Se coloca la viga en la posición como estuviera entre las llantas pero en la parte exterior de las mismas, haciendo coincidir igualmente, haciendo uso de una plomada, el extremo del brazo móvil con el eje vertical del centro de gravedad, tomando como punto de referencia la varilla vertical adosada a la parte trasera del camión (ver Fig. 2.22), se efectúa una marca en la viga de manera tal que, en adelante, basta con hacerlas coincidir para asegurarse que el extremo de la viga coincide con el centro de las llantas, en el momento de iniciar las mediciones.

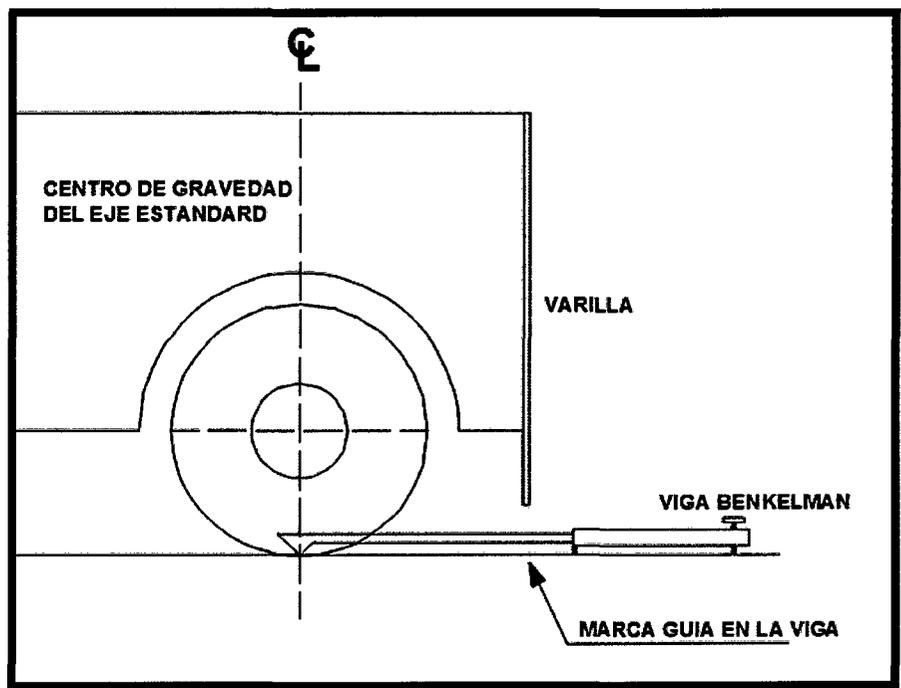


Figura 2.22. Alineamiento del extremo de la viga Benkelman con el centro de las llantas.

De igual forma se puede efectuar, a partir de la primera, sucesivas marcas a distancias elegidas a las cuales se desee medir deflexiones adicionales (puede ser a 25, 50, 75 y 100 cm) o por lo menos 3 lecturas, pero se pueden obtener más, con

finés de verificaci3n, lo cual es recomendable, o si es que se desea obtener una idea gráfica del tipo de curva de deflexiones que se producen.



Figura 2.23. Divisi3n de la viga Benkelman en secciones de 25cm, para la toma de medidas.

- IV. Una vez instalada la viga en el punto de medici3n haciendo coincidir con la guía vertical y la marca inicial, se verificara que esta se encuentre alineada longitudinalmente con la direcci3n del movimiento del camión.
- V. Se retira o liberan los seguros del o brazos móviles y se ajusta la base de la viga por medio del tornillo trasero, de madera que el o los brazos móviles de medici3n quede en contacto con el vástago del o los diales.
- VI. Se ajusta el dial de modo que su vástago tenga un recorrido libre entre 4 y 6 mm (4 o 6 vueltas).
Se gira la esfera del dial del extens3metro, hasta que la aguja quede en cero y se verificara la lectura golpeando suavemente con un lápiz y poniendo en marcha el vibrador de la viga. Girar la esfera si es necesario y repetir la operaci3n hasta obtener la posici3n cero (0).
El ensayo comenzara cuando se compruebe que dicha lectura permanece constante, asegurando el equilibrio del pavimento bajo carga. Se da por

estabilizada la deformación producida por la carga, cuando la lectura inicial varía en 0.01 mm/minuto o menos.

Establecida la lectura inicial en cero, se hace avanzar el camión suavemente a una velocidad de **1 km/h**, procediéndose a tomar las lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con la primera, segunda y demás marcas adicionales (Fig.2.24.), y una lectura final cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo hasta una distancia de **8 metros**². Aproximadamente en que el indicador del dial ya no tenga movimiento, registro que corresponde al punto de referencia con deflexión cero.

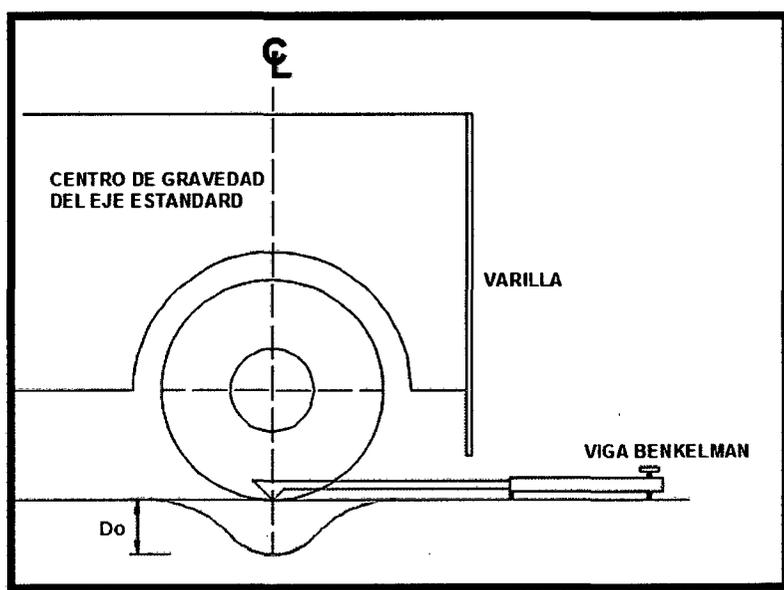


Figura 2.24. a. Posición inicial (D_o = Deflexión máxima).

² Norma ASTM – D 4695

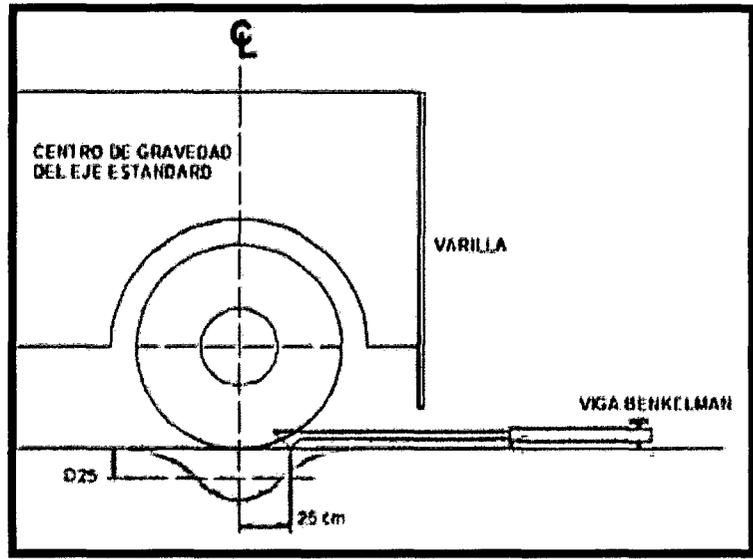


Figura 2.24. b. Posición a 25cm (D_{25}).

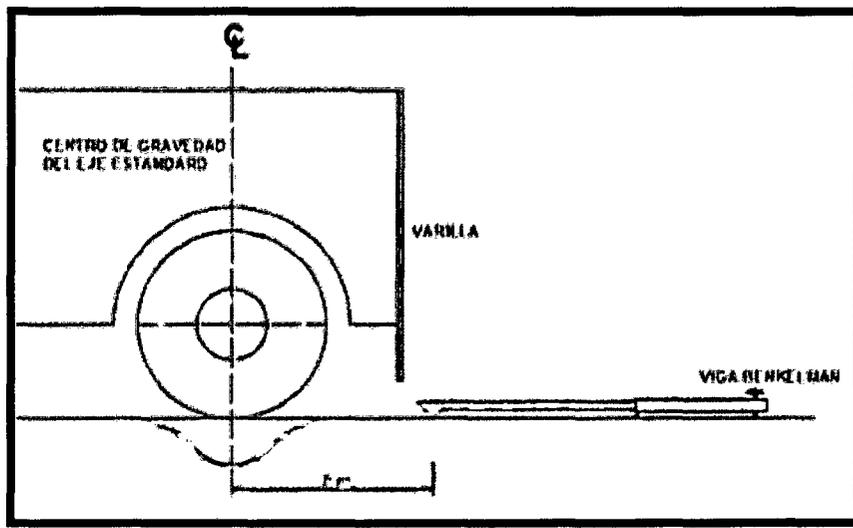


Figura 2.24. c. Posición final ($D = 0$).

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

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

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

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

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

2.2.7.2. TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A. CÁLCULO DE LAS DEFLEXIONES

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

Como las lecturas que se toman en el dial corresponden a componentes de deformación en un proceso de descarga, el valor o lectura final será menos que el inicial. Tal como se puede mostrar en el formato de cálculo de deflexiones que se adjunta del tramo km 23+000 – km 24+000. Progresivas de las cuales se obtuvieron las siguientes medidas.

Tabla N° 2.09. Tabla de Lecturas tomadas en Campo, km 23+000 - km 24+000.

| PROGRESIVA (km) | Lecturas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|--------------------|----------------------------------|------|-------|
| | Inicial | 25 | Final |
| 23+000 | 100 | 91.5 | 71 |
| 23+200 | 100 | 89.4 | 58 |
| 23+400 | 100 | 80 | 52 |
| 23+600 | 100 | 73 | 53 |
| 23+800 | 100 | 88 | 65 |
| 24+000 | 100 | 85 | 59 |

Fuente: Elaboración propia.

En que el dato inicial es la deformación máxima y el valor final es la recuperación total.

El cálculo de las deflexiones se efectuara por diferencia de lecturas de dial, tomándose como sustrayendo la lectura final. La deflexión para cada punto es decir para 25 y la máxima (D_0) será:

Tabla N° 2.10. Tabla de Cálculo de Deflexiones, km 23+000 - km 24+000.

| PROGRESIVA (km) | Deflexiones ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|--------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| | D_0 | D_{25} | D_{final} |
| 23+000 | $(100-71)\times 4 = 116$ | $(91.5-71)\times 4 = 82$ | $(71-71)\times 4 = 0$ |
| 23+200 | $(100-58)\times 4 = 168$ | $(89.4-58)\times 4 = 125.6$ | $(58-58)\times 4 = 0$ |
| 23+400 | $(100-52)\times 4 = 192$ | $(80-52)\times 4 = 112$ | $(52-52)\times 4 = 0$ |
| 23+600 | $(100-53)\times 4 = 188$ | $(73-53)\times 4 = 80$ | $(53-53)\times 4 = 0$ |
| 23+800 | $(100-65)\times 4 = 140$ | $(88-65)\times 4 = 92$ | $(65-65)\times 4 = 0$ |
| 24+000 | $(100-59)\times 4 = 164$ | $(85-59)\times 4 = 104$ | $(59-59)\times 4 = 0$ |

Fuente: Elaboración propia.

Las diferencias se multiplicaran, por un factor de corrección debido a la relación de brazos de la Viga Benkelman, que en este caso para la medición del tramo km. 23+000 – km. 24+000, la relación de brazos es de 1:4, por lo tanto el factor es 4.

B. CORRECCIÓN POR TEMPERATURA

Es de vital importancia tomar en cuenta la temperatura de la carpeta asfáltica al momento de realizar la prueba, ya que esta tiene una influencia directa sobre las Deflexiones registradas.

La temperatura como factor climático y ambiental es un agente externo de gran influencia en los análisis de deflexión, el cual afecta directamente la rigidez de la carpeta asfáltica, cuyas propiedades visco elásticas son dependientes de esta variación.

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

$$D_{20} = D_t / ((k (t - 20) * e) + 1) \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

D_{20} : Deflexión corregida, a la temperatura estándar de 20 °C.

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

K : 1×10^{-3} ; constante para capas granulares (1/ cm °C).

T : Temperatura de la carpeta asfáltica del pavimento (°C).

E : Espesor de la carpeta asfáltica (cm).

En la progresiva km. 23+000 – km. 24+000, por ejemplo, se calcula de la siguiente. Manera:

$$F_{ct} = 1 / ((0.001 \times (21 - 20) \times 2.54) + 1) = 0.997466$$

Tabla N° 2.11. Tabla de Cálculo de Deflexiones Corregidas por Temperatura, km 23+000 - km 24+000.

| PROGRESIVA (km) | Temperatura (°C) | Espesor Carpeta (cm) | Deflexiones corregidas (Temperatura) (x 10 ⁻²) mm | | |
|--------------------|---------------------|----------------------------|--|-----------------|--------------------|
| | | | D ₀ | D ₂₅ | D _{final} |
| 23000 | 21 | 20 | 115.71 | 81.79 | 0.000 |
| 23200 | 21 | 20 | 167.57 | 125.28 | 0.000 |
| 23400 | 21 | 20 | 191.51 | 111.72 | 0.000 |
| 23600 | 21 | 20 | 187.52 | 79.8 | 0.000 |
| 23800 | 21 | 20 | 139.65 | 91.77 | 0.000 |
| 24000 | 21 | 20 | 163.58 | 103.74 | 0.000 |

Fuente: Elaboración propia.

C. CORRECCIÓN POR ESTACIONALIDAD

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

Tabla N° 2.12. Tabla de Factores de Corrección por Estacionalidad.

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

Fuente: CONREVIAl

En nuestro caso el factor de Corrección por Estacionalidad, tomara el Valor de uno (01), debido a que los ensayos fueron tomados en tiempos lluviosos.

Por lo tanto el cálculo de las Deflexiones Afectadas por la Estacionalidad es:

Tabla N° 2.13. Tabla de Cálculo de Deflexiones Corregidas por Estacionalidad, km 23+000 - km 24+000.

| PROGRESIVA (km) | Deflexiones (x 10 ⁻²) mm | | | Deflexiones Corregidas por Estacionalidad (x 10 ⁻²) mm | | |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------|--|-----------------|--------------------|
| | D ₀ | D ₂₅ | D _{final} | D ₀ | D ₂₅ | D _{final} |
| 23000 | 113.725 | 80.392 | 0.000 | 113.725 | 80.392 | 0.000 |
| 23200 | 164.706 | 123.137 | 0.000 | 164.706 | 123.137 | 0.000 |
| 23400 | 188.235 | 109.804 | 0.000 | 188.235 | 109.804 | 0.000 |
| 23600 | 184.313 | 78.431 | 0.000 | 184.313 | 78.431 | 0.000 |
| 23800 | 137.255 | 90.196 | 0.000 | 137.255 | 90.196 | 0.000 |
| 24000 | 160.784 | 101.961 | 0.000 | 160.784 | 101.961 | 0.000 |

Fuente: Elaboración propia.

2.2.7.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS USANDO LA METODOLOGÍA CONREVIAl.

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

A. DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA

El radio de curvatura de la línea elástica de Deflexión es una característica de fundamental importancia, que determina la magnitud de la deformación lineal por tracción que sufren las capas elásticas al flexionar bajo las cargas, y en consecuencia, en el desarrollo del fisuramiento en forma de piel de cocodrilo.

Las primeras tentativas para expresar numéricamente la curvatura se basaron en relacionar la Deflexión máxima con el diámetro del área superficial deformada (índice de curvatura), lo que resulta algo aleatorio por las dificultades para fijar el punto donde la línea de Deflexión es tangencial a la horizontal. Un análisis de los diversos procedimientos de medición permite comprobar que uno del más simple es el que está basado en la comprobación experimental; así la línea de Deflexión se aproxima a una parábola hasta una distancia algo mayor de 25 cm. Del eje de carga, para sufrir luego una inflexión y tender asintóticamente hacia la horizontal, la curvatura de la parábola queda definida por su parámetro. El radio de curvatura queda definido por la siguiente relación:

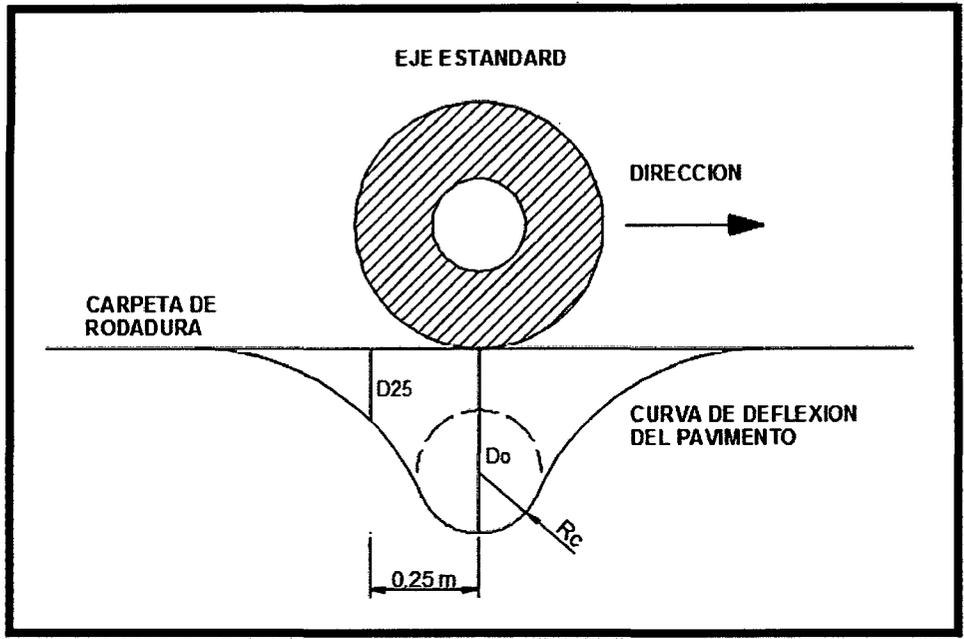


Figura 2.25. Deformada del pavimento y parámetros de comparación.

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

- R_c = Radio de Curvatura en metros
- D_0 = Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga, en centésimas de Milímetros.
- D_{25} = Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga, en centésimas de Milímetros, A 25 del eje de carga.

B. DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA

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

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

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

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

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

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

Tal como muestra la tabla 2.14, el valor “t” corresponde a un porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la deflexión característica D_c.

Tabla N° 2.14. Valor de “t” y probabilidad de ocurrencia de D > D_c

| Valor de diseño | D _c | Área D > D _c % |
|-----------------|----------------|---------------------------|
| 50 | D | 50 |
| 75 | D + 0.674 δ | 25 |
| 85 | D + δ | 15 |
| 90 | D + 1.3 δ | 10 |
| 95 | D + 1.645 δ | 5 |
| 98 | D + 2 δ | 2 |
| 99 | D + 2.33 δ | 1 |

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

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

En la división de carretas de california se considera trabajar con el 80% percentil, mientras que el Instituto del Asfalto recomienda usar el 98%, a lo cual le corresponde una Dc igual a $(D+2 \delta)$.

El método CONREVIAl adopta un valor Dc igual a $(D+1.645 \delta)$ que corresponde al 95% de probabilidad de diseño, superada sólo por el 5% de las determinaciones efectuadas.

C. DEFLEXIÓN ADMISIBLE

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

$$D_a = (1.15/N_{18})^{1/4} \dots \dots (12)$$

Donde:

Da = Deflexión Admisible inicial (mm).

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

D. DEFLEXIÓN CRÍTICA

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

$$D_{cr} = \left(\frac{1.90}{N_{18}} \right)^{\frac{1}{5.3}} \dots \dots \dots (13)$$

Donde:

D_{cr} = Deflexión Admisible inicial (mm).

N_{18} = Número total de ejes equivalentes de 8.2 ton. Expresado en millones.

2.2.7.4. CRITERIOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

Dentro de la metodología de la viga Benkelman existen valores característicos de deflexiones en pavimento, como las deflexiones medidas en los ensayos (D_0) y la rigidez relativa (L_0) entre un pavimento y su Subrasante, los cuales se pueden utilizar para establecer relaciones cualitativas entre las características de la curva de deflexiones y el sistema Pavimento-Subrasante. (Ver Fig. 2.26, 2.27, 2.28, 2.29).

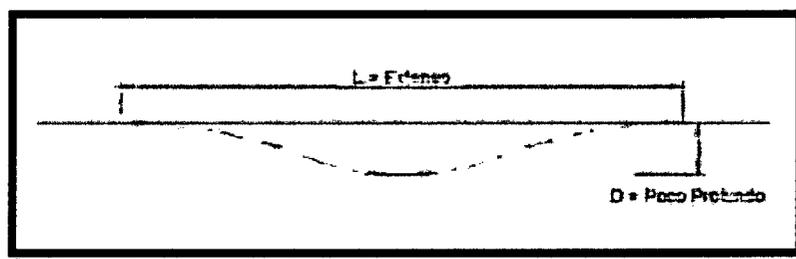


Figura 2.26. Deflexión tipo I, curva extensa poco profunda.

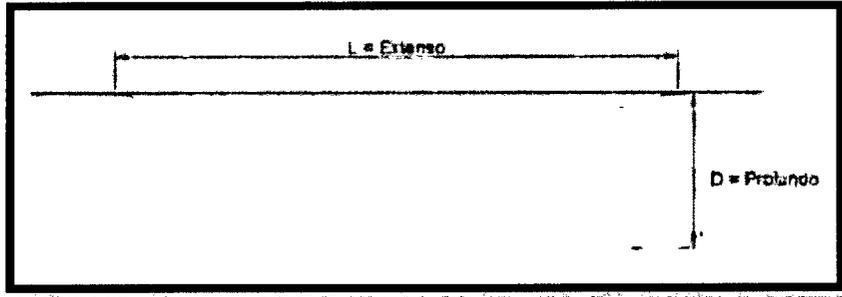


Figura 2.27. Deflexión tipo II, curva extensa profunda.

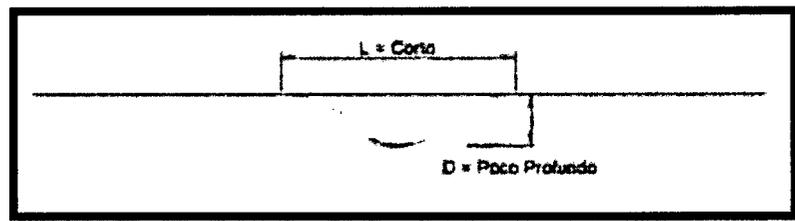


Figura 2.28. Deflexión tipo III, curva corta poco profunda.

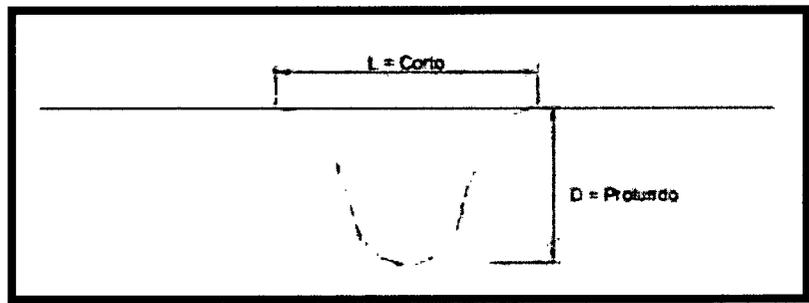


Figura 2.29. Deflexión tipo IV, curva corta profunda.

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

Tabla N° 2.15. Características del Pavimento de acuerdo al Tipo de Deflexión y Radio de Curvatura.

| Tipo de Deflexión | Comportamiento de la Subrasante | Comportamiento del Pavimento |
|-------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Tipo I | Bueno $D < Da$ | Bueno $Ro > 100$ |
| Tipo II | Malo $D > Da$ | Bueno $Ro > 100$ |
| Tipo III | Bueno $D < Da$ | Malo $Ro < 100$ |
| Tipo IV | Malo $D > Da$ | Malo $Ro < 100$ |

Fuente: Método Conrevial

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

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

debido a un espesor de las capas del pavimento insuficientes o un alto grado de deterioro de dichas capas, las cuales ya no cumplen con los estándares de calidad solicitados (en granulometría, compactación, CBR, etc.).

- Tipo IV: Estos modelos de deformación poseen un mal comportamiento estructural de subrasante y un mal comportamiento estructural del pavimento, ya que presentan un radio de curvatura pequeño y una deflexión grande. Esto debido a un espesor de las capas del pavimento insuficientes o un alto grado de deterioro de dichas capas, además de una subrasante que posee materiales inadecuados con un bajo CBR, así como deficiencia en el grado de compactación y/o mal drenaje.

Para el siguiente proyecto de investigación se ha tomado en cuenta los criterios de evaluación propuestos por el DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), evaluación estructural de pavimentos flexibles. Los cuales son presentados en la Tabla N° 2.16.

Tabla N° 2.16. Criterios para la Evaluación Estructural de Pavimentos.

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

Fuente: DNER

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.PERIODO DE ESTUDIO

La investigación se realizó en la Universidad Nacional de Cajamarca en el periodo de Enero - Marzo del 2015

3.2.UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

UBICACIÓN POLÍTICA:

Localidades : Sunuden – San Miguel de Pallaques
Distrito : San Miguel de Pallaques
Provincia : San Miguel
Departamento : Cajamarca

El pavimento en estudio corresponde al tramo de la carretera La Conga (San Pablo) – San Miguel de Pallaques (San Miguel), que une las localidades de **Sunuden (Km. 23 + 000)** y **San Miguel de Pallaques (Km. 28 +000)**, la cual es clasificada por su función como red vial secundaria o carretera de la red vial departamental o regional.³

UBICACIÓN GEOGRÁFICA:

| Punto Inicial : Km. 23 + 000 CC.PP. Sunuden (WGS – 84) | |
|---|----------------------------|
| COORDENADAS UTM | COORDENADAS GEOGRÁFICAS |
| Este : 735 608 E | Latitud = 7° 1' 17.29" S |
| Norte : 9 223 333 N | Longitud = 78° 52' 2.36" O |
| Altitud : 2,267 m.s.n.m. | Altitud = 2,267 m.s.n.m. |

Fuente: Elaboración propia

³ MTC. DGC.F. Manual de diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito, p. 42.

| Punto Final : Km. 28 + 000 San Miguel de Pallaques (WGS – 84) | |
|--|----------------------------|
| COORDENADAS UTM | COORDENADAS GEOGRÁFICAS |
| Este : 737 447 E | Latitud = 7° 0' 18.28" S |
| Norte : 9 225 138 N | Longitud = 78° 51' 2.74" O |
| Altitud : 2,551 m.s.n.m. | Altitud = 2,551 m.s.n.m. |

Fuente: Elaboración propia

3.3.TIPO DE CARRETERA

La Carretera La Conga (San Pablo) – San Miguel de Pallaques, es Clasificada como:

- **Clasificación según su Función:** Sistema Departamental.
- **Clasificación de acuerdo a la Demanda:** Carretera de 3° Clase.
- **Clasificación según Condiciones Orográficas:** Carretera Tipo 3.

El pavimento en estudio es un Pavimento Flexible – Tratamiento Bicapa.

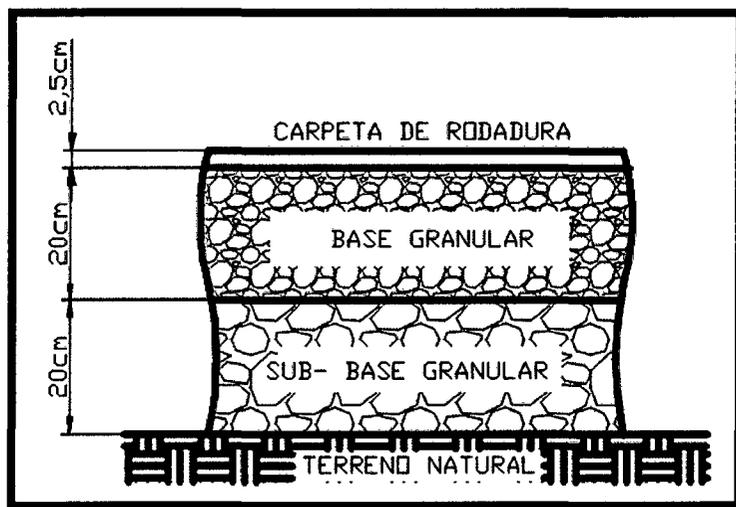


Figura 3.01. Estructura del pavimento en estudio

3.4.MATERIALES E INSTRUMENTOS

- **Hoja de registro de datos:** Documento donde debe registrarse la información obtenida durante el proceso de inspección (Tabla 3.01).
- **Odómetro:** Instrumento manual que permite obtener mediciones longitudinales más precisas. Debe de tener una lectura aproximada de 30mm. (Fig. 3.02).

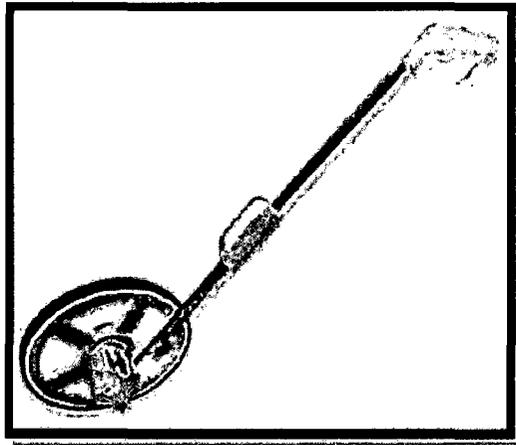


Figura 3.02. Odómetro manual

- **Plano de Distribución:** plano de la red del pavimento que será evaluada (Anexo 5).
- **Deflectómetro Viga Benkelman:** una viga Benkelman de doble brazo con sus correspondientes diales registradores (al 0.01 mm y recorrido 12 mm) y las siguientes dimensiones fundamentales (Fig. 3.03):
 - Longitud del primer brazo de ensayo, desde el pivote al punto de prueba =2.440 m.
 - Longitud del primer brazo de ensayo, desde el pivote al punto de apoyo del vástago de su dial registrador = 0.610 m.
 - Longitud del segundo brazo de ensayo, desde el pivote a la punta de prueba =2190 m.
 - Longitud del segundo brazo de ensayo, desde el pivote al punto de apoyo del vástago de su dial registrador = 0.5475 m.

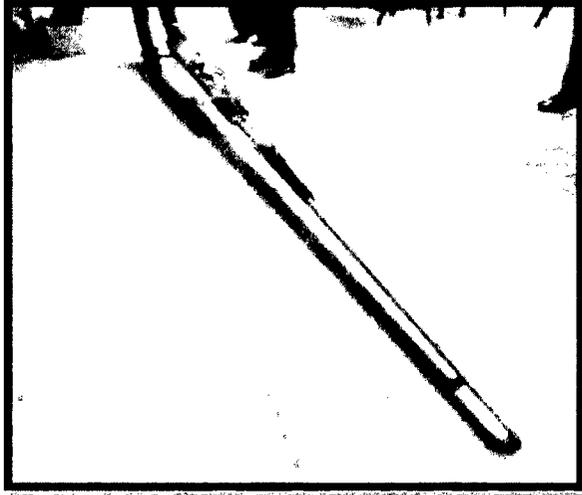


Figura 3.03. Viga Benkelman

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



Figura 3.04. Camión para ensayo.

Tabla N° 3.01. Formato de toma de datos de Campo

| HOJA DE DATOS CAMPO | | | | | | | | |
|---|---------------------------|----|-------|--------------------------------------|----|-------|--------------------|---------------|
| CARRETERA: | | | | | | | | |
| TRAMO: | | | | | | | | |
| TIPO DE PAVIMENTO: | | | | | | | | |
| CARGA DE EJE: | | | | | | | | |
| PRESIÓN DE INFLADO: | | | | | | | | |
| FECHA: | | | | | | | | |
| REALIZADO POR: | | | | | | | | |
| TEMPERATURA: | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | |
| PROGRESIVA | LECTURAS DE DEFLECTOMETRO | | | DEFLEXIONES (mm x 10 ⁻²) | | | RADIO DE CURVATURA | OBSERVACIONES |
| | Inicial | 25 | Final | Inicial | 25 | Final | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.INFORMACIÓN PRELIMINAR

A continuación se dará una explicación general de la zona en estudio correspondiente a la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques, Tramo Jancos – San Miguel de Pallaques, donde se llevó a cabo la inspección visual; con el fin de conocer el lugar de trabajo y tener en cuenta las características de tránsito de la carretera.

4.2.ANTECEDENTES

La carretera La Conga – San Miguel de Pallaques, Tramo Jancos – San Miguel de Pallaques, fue construida en el año 2009 – 2010. Este proyecto consistió en el asfaltado de 14 kilómetros más 100 metros de carretera, desde Jancos hasta San Miguel de Pallaques. Utilizando un tratamiento de bicapa en dos carriles y ancho de calzada de 5.50 metros.

4.3.CARGA DE TRÁNSITO

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

Es por esto, que es de suma importancia conocer el tipo de vehículos que van a transitar una determinada vía. Para nuestro caso, los vehículos que recorren la Carretera La Conga – San Miguel de Pallaques son los siguientes: motos lineales, autos combis y camiones (volquetes). Estos últimos son los que van a ejercer mayor influencia en el deterioro del pavimento.

El flujo vehicular en la red de pavimento es constante, es decir, no hay variaciones significativas del tránsito. Se puede considerar que en todo el recorrido de la vía, el tráfico es el mismo (Anexo 2).

4.4.APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA MEDICIONES DE DEFORMACIONES EN PAVIMENTOS

Se detalla la metodología aplicada para el caso particular de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques, Tramo Jancos – San Miguel de Pallaques, siguiendo los lineamientos definidos por el AASHTO T256-01. “Método Estándar de Prueba para las Mediciones de Deformación en Pavimento” y ASTM D4695 – “Guía Estándar para las Mediciones de Deformación del Pavimento en General”.

4.5.MUESTREO Y UNIDADES DE MUESTRA

El muestreo se llevó a cabo para un Nivel de Proyecto General. Este nivel de pruebas proporciona un análisis más detallado del pavimento, por ejemplo, para el propósito de diseño de rehabilitación. Las pruebas deben realizarse en un intervalo de 50 m hasta 200 m, dependiendo de las condiciones del pavimento es recomendable la toma de 15 pruebas mínimo.⁴

Para nuestro caso se realizaron los ensayos cada 200 m, ubicados a 45 centímetros del borde del pavimento. Evitando las zonas en donde se ha perdido total o parcialmente la capa de rodadura, debido a que estas zonas ya presentan una falla funcional, por lo que no se distribuirán apropiadamente las deformaciones y los esfuerzos.

⁴ ASTM. D4695 – “Guía Estándar para las Mediciones de Deformación del Pavimento en General”, p. 3.

Tabla N° 4.01. Unidades de Muestra a Evaluar.

| UNIDADES DE MUESTRA A EVALUAR | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------------|---|
| MUESTRA | PROGRESIVA | LONGITUD (m) | ANCHO DE CALZADA (m) |
| 01 | Km 23+000 | - | 5.5 |
| 02 | Km 23+200 | 200 | 5.5 |
| 03 | Km 23+400 | 200 | 5.5 |
| 04 | Km 23+600 | 200 | 5.5 |
| 05 | Km 23+800 | 200 | 5.5 |
| 06 | Km 24+000 | 200 | 5.5 |
| 07 | Km 24+200 | 200 | 5.5 |
| 08 | Km 24+400 | 200 | 5.5 |
| 09 | Km 24+600 | 200 | 5.5 |
| 10 | Km 24+800 | 200 | 5.5 |
| 11 | Km 25+000 | 200 | 5.5 |
| 12 | Km 25+300 | 300 | 5.5 |
| 13 | Km 25+500 | 200 | 5.5 |
| 14 | Km 25+650 | 150 | 5.5 |
| 15 | Km 25+900 | 250 | 5.5 |
| 16 | Km 26+100 | 200 | 5.5 |
| 17 | Km 26+300 | 200 | 5.5 |
| 18 | Km 26+500 | 200 | 5.5 |
| 19 | Km 26+700 | 200 | 5.5 |
| 20 | Km 26+900 | 200 | 5.5 |
| 21 | Km 27+100 | 200 | 5.5 |
| 22 | Km 27+300 | 200 | 5.5 |
| 23 | Km 27+500 | 200 | 5.5 |
| 24 | Km 27+800 | 300 | 5.5 |
| 25 | Km 28+000 | 200 | 5.5 |

Fuente: Elaboración propia

4.6.PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN

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

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

Los cuales se detallan a continuación.

- Registramos la distancia entre unidades de muestra, medido con el odómetro manual (de 200.00 metros de longitud).
- Posteriormente se registró el tramo y número de sección, así como el número de unidad de muestra. Ubicado a 0.45 m del borde del pavimento.
- Calibrar los deflectómetros a usar en el ensayo.
- Transportar la viga Benkelman y el camión de ensayo a la ubicación de prueba.
- Se tomó la medida de la temperatura del pavimento
- Posicionar la viga Benkelman de modo que el aguilón del brazo móvil de la viga se ubique entre los neumáticos de una de las ruedas duales del eje trasero del camión.
- Liberar los tornillos de fijación de los brazos móviles de la viga y encender el vibrador de la viga, para luego ajustar el dial del extensómetro en 0.000 mm, para empezar la secuencia de prueba.
- Desplace el camión de prueba a una velocidad de 1 km/h, una distancia de 8m.
- Se repitió este procedimiento para cada unidad de muestra a ser inspeccionada.

4.7.DETERMINACIÓN DE LAS DEFLEXIONES EN EL PAVIMENTO

Se tomaron 25 puntos de ensayo en la vía separados aproximadamente 200 m, ampliándose más esta distancia en zonas de gran deterioro del paquete estructural.

Se tomaron las mediciones de deflexiones en campo haciendo el uso de una Viga Benkelman modelo Orión, la cual poseía una relación de Brazos de 1:4.

Se usó un Vehículo tipo camión, el cual poseía un peso de 8.200 Ton en el eje posterior, y una presión de inflado de sus llantas de 85 PSI, cumpliendo así con el peso estipulado en la Norma ASTM 4695.

Se realizó la medida de la temperatura del pavimento, obteniéndose 21°C, al momento de realizarse el ensayo.

A continuación se presenta los datos de campo obtenidos durante la toma de Deflexiones en la Carretera La Conga – San Miguel de Pallaques, tramo Sunuden - San Miguel de Pallaques.

Tabla N° 4.02. Lecturas de las diferentes Unidades Evaluadas.

| MUESTRA | PROGRESIVA | Lecturas (x 10 ⁻²) mm | | |
|---------|------------|-----------------------------------|------|-------|
| | | Inicial | 25 | final |
| 01 | Km 23+000 | 100 | 91.5 | 71 |
| 02 | Km 23+200 | 100 | 89.4 | 58 |
| 03 | Km 23+400 | 100 | 80 | 52 |
| 04 | Km 23+600 | 100 | 73 | 53 |
| 05 | Km 23+800 | 100 | 88 | 65 |
| 06 | Km 24+000 | 100 | 85 | 59 |
| 07 | Km 24+200 | 100 | 84 | 68 |
| 08 | Km 24+400 | 100 | 89.4 | 76 |
| 09 | Km 24+600 | 100 | 90 | 63 |
| 10 | Km 24+800 | 100 | 88 | 71 |
| 11 | Km 25+000 | 100 | 83 | 59 |
| 12 | Km 25+300 | 100 | 89 | 78 |
| 13 | Km 25+500 | 100 | 81 | 67 |
| 14 | Km 25+650 | 100 | 85.5 | 73 |
| 15 | Km 25+900 | 100 | 80 | 66 |
| 16 | Km 26+100 | 100 | 85 | 68 |
| 17 | Km 26+300 | 100 | 85 | 62 |
| 18 | Km 26+500 | 100 | 80 | 56 |
| 19 | Km 26+700 | 100 | 90 | 78 |
| 20 | Km 26+900 | 100 | 87 | 72 |
| 21 | Km 27+100 | 100 | 84 | 59 |
| 22 | Km 27+300 | 100 | 88 | 66 |
| 23 | Km 27+500 | 100 | 92 | 84 |
| 24 | Km 27+800 | 100 | 75 | 64 |
| 25 | Km 28+000 | 100 | 71 | 55 |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-01

La unidad de muestra U-01, se encuentra ubicado en la Progresiva km 23+000, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 91.9 m. así como una Deflexión final de 114×10^{-2} mm (ver Tabla 4.3).

Tabla N° 4.03. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-01.

| PROGRESIVA : km 23 + 000 | | |
|--|------|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | Final |
| 100 | 91.5 | 71 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|---------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-71) \times 4 = 116$ | $(91.5-71) \times 4 = 82$ | $(71-71) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 116 \times 0.997466 = 115.706056 = 116$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 82 \times 0.997466 = 81.792212 = 82$ | | |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 116 | 82 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|--|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (116 - 82)) = 91.9$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-02

La unidad de muestra U-02, se encuentra ubicado en la Progresiva km 23+200, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 74.4 m. así como una Deflexión final de 165×10^{-2} mm (ver Tabla 4.4).

Tabla N° 4.04. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-02.

| PROGRESIVA : km 23 + 200 | | |
|--|------|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 89.4 | 58 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|------------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-58) \times 4 = 168$ | $(89.4-58) \times 4 = 125.6$ | $(58-58) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 168 \times 0.997466 = 167.574288 = 168$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 125.6 \times 0.997466 = 125.2817296 = 125$ | | |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 168 | 125 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|---|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (168 - 125)) = 72.7$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-03

La unidad de muestra U-03, se encuentra ubicado en la Progresiva km 23+400, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 40.1 m. así como una Deflexión final de 118×10^{-2} mm (ver Tabla 4.5).

Tabla N° 4.05. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-03.

| PROGRESIVA : km 23 + 400 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 80 | 52 |

| Deflexiones ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|---|--------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-52) \times 4 = 192$ | $(80-52) \times 4 = 112$ | $(52-52) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 192 \times 0.997466 = 191.513472 = 192$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 112 \times 0.997466 = 111.716192 = 112$ | | |

| Deflexiones Corregidas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 192 | 112 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|---|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (192 - 112)) = 39.1$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-04

La unidad de muestra U-04, se encuentra ubicado en la Progresiva km 23+600, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 29.5 m. así como una Deflexión final de 184×10^{-2} mm (ver Tabla 4.6).

Tabla N° 4.06. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-04.

| PROGRESIVA : km 23 + 600 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 73 | 53 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-53) \times 4 = 188$ | $(73-53) \times 4 = 80$ | $(53-53) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 188 \times 0.997466 = 187.523608 = 188$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 80 \times 0.997466 = 79.79728 = 80$ | | |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 188 | 80 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|--|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (188 - 80)) = 28.9$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-05

La unidad de muestra U-05, se encuentra ubicado en la Progresiva km 23+800, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 66.5 m. así como una Deflexión final de 137×10^{-2} mm (ver Tabla 4.7).

Tabla N° 4.07. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-05.

| PROGRESIVA : km 23 + 800 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 88 | 65 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-65) \times 4 = 140$ | $(88-65) \times 4 = 92$ | $(65-65) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 140 \times 0.997466 = 139.64524 = 140$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 92 \times 0.997466 = 91.766872 = 92$ | | |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 140 | 92 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|--|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (140 - 92)) = 65.1$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-06

La unidad de muestra U-06, se encuentra ubicado en la Progresiva km 24+000, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 53.0 m. así como una Deflexión final de 161×10^{-2} mm (ver Tabla 4.8).

Tabla N° 4.08. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-06.

| PROGRESIVA : km 24 + 000 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
| Inicial | | final |
| 100 | 25 | 59 |
| | 85 | |

| Deflexiones ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|---|--------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-59) \times 4 = 164$ | $(85-59) \times 4 = 104$ | $(59-59) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 164 \times 0.997466 = 163.584424 = 164$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 104 \times 0.997466 = 103.736464 = 104$ | | |

| Deflexiones Corregidas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 164 | 104 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|---|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (164 - 104)) = 52.1$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-07

La unidad de muestra U-07, se encuentra ubicado en la Progresiva km 24+200, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 50.4 m. así como una Deflexión final de 125×10^{-2} mm (ver Tabla 4.9).

Tabla N° 4.09. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-07.

| PROGRESIVA : km 24 + 200 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 84 | 68 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-68) \times 4 = 128$ | $(84-68) \times 4 = 64$ | $(68-68) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura |
|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 128 \times 0.997466 = 127.675648 = 128$ |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 64 \times 0.997466 = 63.837824 = 64$ |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 128 | 64 | 0 |

| Radio de curvatura (m) |
|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (128 - 64)) = 48.8$ |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-08

La unidad de muestra U-08, se encuentra ubicado en la Progresiva km 24+400, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 76.2.0 m. así como una Deflexión final de 94×10^{-2} mm (ver Tabla 4.10).

Tabla N° 4.10. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-08.

| PROGRESIVA : km 24 + 400 | | |
|--|------|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 89.4 | 76 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|-----------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-76) \times 4 = 96$ | $(89.4-76) \times 4 = 53.6$ | $(76-76) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 96 \times 0.997466 = 95.756736 = 96$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 53.6 \times 0.997466 = 53.4641776 = 53$ | | |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 96 | 53 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|---|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (96 - 53)) = 72.7$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-09

La unidad de muestra U-06, se encuentra ubicado en la Progresiva km 24+600, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 80.1 m. así como una Deflexión final de 145×10^{-2} mm (ver Tabla 4.11).

Tabla N° 4.11. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-09.

| PROGRESIVA : km 24 + 600 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 90 | 63 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|--------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-63) \times 4 = 148$ | $(90-63) \times 4 = 108$ | $(63-63) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 148 \times 0.997466 = 147.624968 = 148$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 108 \times 0.997466 = 107.726328 = 108$ | | |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 148 | 108 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|---|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (148 - 108)) = 78.1$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-10

La unidad de muestra U-10, se encuentra ubicado en la Progresiva km 24+800, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 66.5 m. así como una Deflexión final de 114×10^{-2} mm (ver Tabla 4.12).

Tabla N° 4.12. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-10.

| PROGRESIVA : km 24 + 800 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 88 | 71 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-71) \times 4 = 116$ | $(88-71) \times 4 = 68$ | $(71-71) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 116 \times 0.997466 = 115.706056 = 116$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 68 \times 0.997466 = 67.827688 = 68$ | | |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 116 | 68 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|--|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (116 - 68)) = 65.1$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-11

La unidad de muestra U-11, se encuentra ubicado en la Progresiva km 25+000, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 46.6 m. así como una Deflexión final de 161×10^{-2} mm (ver Tabla 4.13).

Tabla N° 4.13. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-11.

| PROGRESIVA : km 25 + 000 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 83 | 59 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-59) \times 4 = 164$ | $(83-59) \times 4 = 96$ | $(59-59) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 164 \times 0.997466 = 163.584424 = 164$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 96 \times 0.997466 = 95.756736 = 96$ | | |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 164 | 96 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|--|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (164 - 96)) = 46.0$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-12

La unidad de muestra U-12, se encuentra ubicado en la Progresiva km 25+300, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 72.7 m. así como una Deflexión final de 86×10^{-2} mm (ver Tabla 4.14).

Tabla N° 4.14. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-12.

| PROGRESIVA : km 25 + 300 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 89 | 78 |

| Deflexiones ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-78) \times 4 = 88$ | $(89-78) \times 4 = 44$ | $(78-78) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 88 \times 0.997466 = 87.777008 = 88$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 44 \times 0.997466 = 43.888504 = 44$ | | |

| Deflexiones Corregidas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 88 | 44 | 0 |

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

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-13

La unidad de muestra U-13, se encuentra ubicado en la Progresiva km 25+500, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 42.2 m. así como una Deflexión final de 129×10^{-2} mm (ver Tabla 4.15).

Tabla N° 4.15. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-13.

| PROGRESIVA : km 25 + 500 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 81 | 67 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-67) \times 4 = 132$ | $(81-67) \times 4 = 56$ | $(67-67) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 132 \times 0.997466 = 131.665512 = 132$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 56 \times 0.997466 = 55.858096 = 56$ | | |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 132 | 56 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|--|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (132 - 56)) = 41.1$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-14

La unidad de muestra U-14, se encuentra ubicado en la Progresiva km 25+650, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 54.8 m. así como una Deflexión final de 106×10^{-2} mm (ver Tabla 4.16).

Tabla N° 4.16. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-14.

| PROGRESIVA : km 25 + 650 | | |
|--|------|-------|
| Lecturas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 85.5 | 73 |

| Deflexiones ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|---|---------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-73) \times 4 = 108$ | $(85.5-73) \times 4 = 50$ | $(73-73) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura |
|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 108 \times 0.997466 = 107.726328 = 108$ |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 50 \times 0.997466 = 49.8733 = 50$ |

| Deflexiones Corregidas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 108 | 50 | 0 |

| Radio de curvatura (m) |
|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (108 - 50)) = 53.9$ |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-15

La unidad de muestra U-15, se encuentra ubicado en la Progresiva km 25+900, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 40.1 m. así como una Deflexión final de 133×10^{-2} mm (ver Tabla 4.17).

Tabla N° 4.17. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-15.

| PROGRESIVA : km 25 + 900 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 80 | 66 |

| Deflexiones ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-66) \times 4 = 136$ | $(80-66) \times 4 = 56$ | $(66-66) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 136 \times 0.997466 = 135.655376 = 136$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 56 \times 0.997466 = 55.858096 = 56$ | | |

| Deflexiones Corregidas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 136 | 56 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|--|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (136 - 56)) = 39.1$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-16

La unidad de muestra U-16, se encuentra ubicado en la Progresiva km 26+100, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 53.9 m. así como una Deflexión final de 125×10^{-2} mm (ver Tabla 4.18).

Tabla N° 4.18. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-16.

| PROGRESIVA : km 26 + 100 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 85 | 68 |

| Deflexiones ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-68) \times 4 = 128$ | $(85-68) \times 4 = 68$ | $(68-68) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura |
|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 128 \times 0.997466 = 127.675648 = 128$ |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 68 \times 0.997466 = 67.827688 = 68$ |

| Deflexiones Corregidas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 128 | 68 | 0 |

| Radio de curvatura (m) |
|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (128 - 68)) = 52.1$ |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-17

La unidad de muestra U-17, se encuentra ubicado en la Progresiva km 26+300, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 53.0 m. así como una Deflexión final de 149×10^{-2} mm (ver Tabla 4.19).

Tabla N° 4.19. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-17.

| PROGRESIVA : km 26 + 300 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 85 | 62 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-62) \times 4 = 152$ | $(85-62) \times 4 = 92$ | $(62-62) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 152 \times 0.997466 = 151.614832 = 152$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 92 \times 0.997466 = 91.766872 = 92$ | | |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 152 | 92 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|--|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (152 - 92)) = 52.1$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-18

La unidad de muestra U-18, se encuentra ubicado en la Progresiva km 26+500, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 39.6 m. así como una Deflexión final de 173×10^{-2} mm (ver Tabla 4.20).

Tabla N° 4.20. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-18.

| PROGRESIVA : km 26 + 500 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 80 | 56 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-56) \times 4 = 176$ | $(80-56) \times 4 = 96$ | $(56-56) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura |
|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 176 \times 0.997466 = 175.554016 = 176$ |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 96 \times 0.997466 = 95.756736 = 96$ |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 176 | 96 | 0 |

| Radio de curvatura (m) |
|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (176 - 96)) = 39.1$ |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-19

La unidad de muestra U-19, se encuentra ubicado en la Progresiva km 26+700, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 80.1 m. así como una Deflexión final de 86×10^{-2} mm (ver Tabla 4.21).

Tabla N° 4.21. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-19.

| PROGRESIVA : km 26 + 700 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 90 | 78 |

| Deflexiones ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-78) \times 4 = 88$ | $(90-78) \times 4 = 48$ | $(78-78) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 88 \times 0.997466 = 87.777008 = 88$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 48 \times 0.997466 = 47.878368 = 48$ | | |

| Deflexiones Corregidas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 88 | 48 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|---|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (88 - 48)) = 78.1$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-20

La unidad de muestra U-20, se encuentra ubicado en la Progresiva km 26+900, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 61.3 m. así como una Deflexión final de 110×10^{-2} mm (ver Tabla 4.22).

Tabla N° 4.22. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-20.

| PROGRESIVA : km 26 + 900 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 87 | 72 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-72) \times 4 = 112$ | $(87-72) \times 4 = 60$ | $(72-72) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura |
|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 112 \times 0.997466 = 111.716192 = 112$ |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 60 \times 0.997466 = 59.84796 = 60$ |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 112 | 60 | 0 |

| Radio de curvatura (m) |
|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (112 - 60)) = 60.1$ |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-21

La unidad de muestra U-21, se encuentra ubicado en la Progresiva km 27+100, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 49.6 m. así como una Deflexión final de 161×10^{-2} mm (ver Tabla 4.23).

Tabla N° 4.23. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-21.

| PROGRESIVA : km 27 + 100 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 84 | 59 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|--------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-59) \times 4 = 164$ | $(84-59) \times 4 = 100$ | $(59-59) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 164 \times 0.997466 = 163.584424 = 164$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 100 \times 0.997466 = 99.7466 = 100$ | | |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 164 | 100 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|---|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (164 - 100)) = 48.8$ | | |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-22

La unidad de muestra U-22, se encuentra ubicado en la Progresiva km 27+300, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 66.5 m. así como una Deflexión final de 133×10^{-2} mm (ver Tabla 4.24).

Tabla N° 4.24. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-22.

| PROGRESIVA : km 27 + 300 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 88 | 66 |

| Deflexiones ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-66) \times 4 = 136$ | $(88-66) \times 4 = 88$ | $(66-66) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura |
|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 136 \times 0.997466 = 135.655376 = 136$ |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 88 \times 0.997466 = 87.777008 = 88$ |

| Deflexiones Corregidas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 136 | 88 | 0 |

| Radio de curvatura (m) |
|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (136 - 88)) = 65.1$ |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-23

La unidad de muestra U-23, se encuentra ubicado en la Progresiva km 27+500, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 97.7 m. así como una Deflexión final de 63×10^{-2} mm (ver Tabla 4.25).

Tabla N° 4.25. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-23.

| PROGRESIVA : km 27 + 500 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 92 | 84 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-84) \times 4 = 64$ | $(92-84) \times 4 = 32$ | $(84-84) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura |
|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 64 \times 0.997466 = 63.837824 = 64$ |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 32 \times 0.997466 = 31.918912 = 32$ |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 64 | 32 | 0 |

| Radio de curvatura (m) |
|---|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (64 - 32)) = 97.7$ |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-24

La unidad de muestra U-24, se encuentra ubicado en la Progresiva km 27+800, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 31.9 m. así como una Deflexión final de 141×10^{-2} mm (ver Tabla 4.26).

Tabla N° 4.26. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-24.

| PROGRESIVA : km 27 + 800 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 75 | 64 |

| Deflexiones ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-64) \times 4 = 144$ | $(75-64) \times 4 = 44$ | $(64-64) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura |
|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 144 \times 0.997466 = 143.635104 = 144$ |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 44 \times 0.997466 = 43.888504 = 44$ |

| Deflexiones Corregidas ($\times 10^{-2}$) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 144 | 44 | 0 |

| Radio de curvatura (m) |
|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (144 - 44)) = 31.3$ |

Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE MUESTRA U-25

La unidad de muestra U-25, se encuentra ubicado en la Progresiva km 28+000, de la carretera La Conga – San Miguel de Pallaques.

Pertenece al tramo 01 de dicha carretera, teniendo un ancho de Calzada de 5.50 m y un espesor de Capa de rodadura de 2.50 cm. Y una temperatura de carpeta de rodadura de 21 °C

Se usó un camión cargado de peso 18000 libras en el eje trasero, presión de inflado de 85 kips

Siguiendo los procedimientos estipulados en la norma MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible, Haciendo uso de la Viga Benkelman”, se logró determinar un Radio de Curvatura de 27.7 m. así como una Deflexión final de 176×10^{-2} mm (ver Tabla 4.27).

Tabla N° 4.27. Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la muestra U-25.

| PROGRESIVA : km 28 + 000 | | |
|--|----|-------|
| Lecturas (x 10⁻²) mm | | |
| Inicial | 25 | final |
| 100 | 71 | 55 |

| Deflexiones (x 10⁻²) mm | | |
|---|-------------------------|------------------------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| $(100-55) \times 4 = 180$ | $(71-55) \times 4 = 64$ | $(55-55) \times 4 = 0$ |

| Factor de corrección por temperatura | | |
|--|--|--|
| $FCt = 1 / ((0.001 \times (21^\circ - 20^\circ) \times 2.50 \text{ cm}) + 1) = 0.997466$ | | |
| $D0-20 = D0 \times FCt = 180 \times 0.997466 = 179.54388 = 180$ | | |
| $D25-20 = D25 \times FCt = 64 \times 0.997466 = 63.837824 = 64$ | | |

| Deflexiones Corregidas (x 10⁻²) mm | | |
|--|-----|--------|
| D0 | D25 | Dfinal |
| 180 | 64 | 0 |

| Radio de curvatura (m) | | |
|--|--|--|
| $Rc = (10 \times 25^2) / (2 \times (180 - 64)) = 26.9$ | | |

Fuente: Elaboración propia

4.8.INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Una vez determinado los valores de las Deflexiones corregidas por temperatura y estacionalidad, se elaboró un cuadro resumen (Tabla 4.28), para luego poder elaborarse el deflectograma correspondiente (Figura 4.03). Así como la evaluación del Pavimento y de la Subrasante (Tabla 4.29).

Tabla N° 4.28. Resumen de Cálculo de las Deflexiones y radio de curvatura de la Carretera San Pablo – San Miguel, Tramo Sunuden – San Miguel.

| MUESTRA | PROGRESIVA | Deflexiones (x 10 ⁻²) mm | | | Radio de Curvatura (m) |
|---------|------------|--------------------------------------|-----|--------|------------------------|
| | | D0 | D25 | Dfinal | |
| 01 | Km 23+000 | 116 | 82 | 0 | 91.9 |
| 02 | Km 23+200 | 168 | 125 | 0 | 72.7 |
| 03 | Km 23+400 | 192 | 112 | 0 | 39.1 |
| 04 | Km 23+600 | 188 | 80 | 0 | 28.9 |
| 05 | Km 23+800 | 140 | 92 | 0 | 65.1 |
| 06 | Km 24+000 | 164 | 104 | 0 | 52.1 |
| 07 | Km 24+200 | 128 | 64 | 0 | 48.8 |
| 08 | Km 24+400 | 96 | 53 | 0 | 72.7 |
| 09 | Km 24+600 | 148 | 108 | 0 | 78.1 |
| 10 | Km 24+800 | 116 | 68 | 0 | 65.1 |
| 11 | Km 25+000 | 164 | 96 | 0 | 46 |
| 12 | Km 25+300 | 88 | 44 | 0 | 71 |
| 13 | Km 25+500 | 132 | 56 | 0 | 41.1 |
| 14 | Km 25+650 | 108 | 50 | 0 | 53.9 |
| 15 | Km 25+900 | 136 | 56 | 0 | 39.1 |
| 16 | Km 26+100 | 128 | 68 | 0 | 52.1 |
| 17 | Km 26+300 | 152 | 92 | 0 | 52.1 |
| 18 | Km 26+500 | 176 | 96 | 0 | 39.1 |
| 19 | Km 26+700 | 88 | 48 | 0 | 78.1 |
| 20 | Km 26+900 | 112 | 60 | 0 | 60.1 |
| 21 | Km 27+100 | 164 | 100 | 0 | 48.8 |
| 22 | Km 27+300 | 136 | 88 | 0 | 65.1 |
| 23 | Km 27+500 | 64 | 32 | 0 | 97.7 |
| 24 | Km 27+800 | 144 | 44 | 0 | 31.3 |
| 25 | Km 28+000 | 180 | 64 | 0 | 26.9 |

| | |
|--------------------------|--------|
| VALOR PROMEDIO | 137.12 |
| DESVIACIÓN STANDARD | 33.47 |
| COEFICIENTE DE VARIACIÓN | 24.4 |
| VALOR CARACTERÍSTICO | 188.3 |

Fuente: Elaboración propia

- **Deflexión Promedio:** Usamos ecuación (3)

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

$$\bar{D} = 137.12$$

- **Deflexión Característica:** Usamos ecuación (6)

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

$$D_c = 137.12 + 1.645 \times 33.47$$

$$D_c = 192.18$$

- **Deflexión Admisible:** Usamos ecuación (7)

$$D_a = (1.15 / N_{18})^{1/4}$$

N₁₈ Calculado en el Estudio de Transito, Anexo 2.

$$D_a = (1.15 / 0.835)^{1/4}$$

$$D_a = 1.08 \text{ mm}$$

- **Deflexión Crítica:** Usamos ecuación (8)

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

$$D_{cr} = \left(\frac{1.90}{0.835} \right)^{\frac{1}{5.3}}$$

$$D_{cr} = 1.17 \text{ mm}$$

Tabla N° 4.29. Resumen de Evaluación de las Deflexiones y radio de curvatura de la Carretera San Pablo – San Miguel, Tramo Sunuden – San Miguel.

| Muest. | Progresiva | Deflexión (x 10 ⁻²) mm | Radio de Curvatura (m) | Valor Admisible | Radio de Curvatur a mínimo | Tipo de Pavimento | Tipo de Subrasante | Calidad Estruc. |
|--------|------------|--|------------------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| 1 | Km 23+000 | 116 | 91.9 | 108 | 100 | REGULAR | MALA | REGULAR |
| 2 | Km 23+200 | 168 | 74.4 | 108 | 100 | MALA | MALA | REGULAR |
| 3 | Km 23+400 | 192 | 40.1 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 4 | Km 23+600 | 188 | 29.5 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 5 | Km 23+800 | 140 | 66.5 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 6 | Km 24+000 | 164 | 53 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 7 | Km 24+200 | 128 | 50.4 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 8 | Km 24+400 | 96 | 76.2 | 108 | 100 | MALA | BUENA | REGULAR |
| 9 | Km 24+600 | 148 | 80.1 | 108 | 100 | REGULAR | MALA | REGULAR |
| 10 | Km 24+800 | 116 | 66.5 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 11 | Km 25+000 | 164 | 46.6 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 12 | Km 25+300 | 88 | 72.7 | 108 | 100 | MALA | BUENA | REGULAR |
| 13 | Km 25+500 | 132 | 42.2 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 14 | Km 25+650 | 108 | 54.8 | 108 | 100 | MALA | BUENA | MALA |
| 15 | Km 25+900 | 136 | 40.1 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 16 | Km 26+100 | 128 | 53.9 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 17 | Km 26+300 | 152 | 53 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 18 | Km 26+500 | 176 | 39.6 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 19 | Km 26+700 | 88 | 80.1 | 108 | 100 | REGULAR | BUENA | REGULAR |
| 20 | Km 26+900 | 112 | 61.3 | 108 | 100 | MALA | BUENA | MALA |
| 21 | Km 27+100 | 164 | 49.6 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 22 | Km 27+300 | 136 | 66.5 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 23 | Km 27+500 | 64 | 97.7 | 108 | 100 | REGULAR | BUENA | BUENA |
| 24 | Km 27+800 | 144 | 31.9 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |
| 25 | Km 28+000 | 180 | 27.7 | 108 | 100 | MALA | MALA | MALA |

Fuente: Elaboración propia

La evaluación se Realiza de acuerdo a los Criterios de Evaluación Estructural de Pavimentos – DNER PRO 011-79 (Tabla 2.15 y 2.16)



Figura 4.01. Porcentaje de unidades de muestra con un comportamiento de subrasante bueno o Malo, de la Carretera San Pablo – San Miguel, Tramo Sunuden – San Miguel.

El grafico 4.01, nos muestra el porcentaje de unidades de muestra con un comportamiento de subrasante bueno o malo, esto debido a la deflexión presente en algunas muestras, que sobrepasaron el valor de deflexión admisible, lo que diferenciaba entre un comportamiento bueno de la subrasante o un comportamiento malo.

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

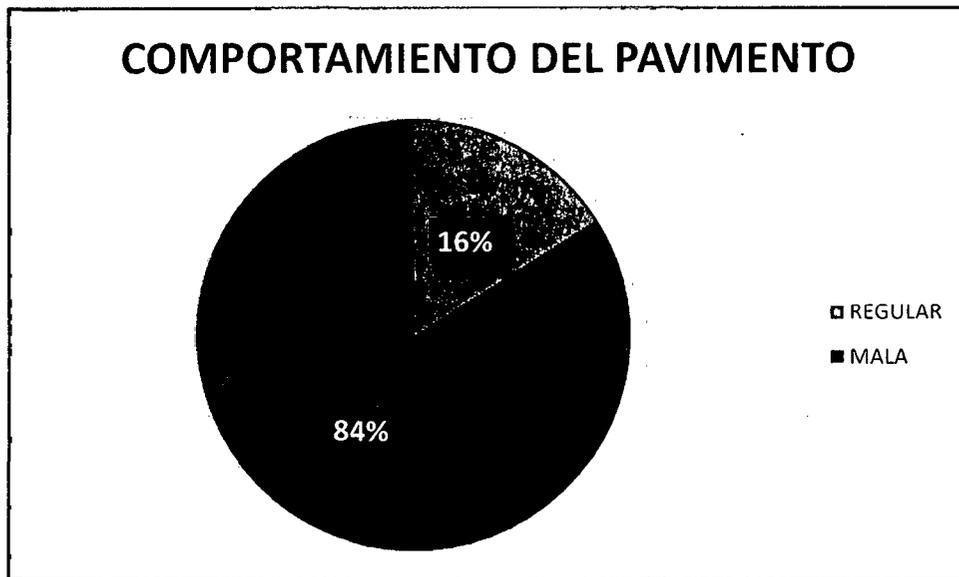


Figura 4.02. Porcentaje de unidades de muestra con un comportamiento de pavimento regular o malo, de la carretera San Pablo – San Miguel, tramo Sunuden – San Miguel.

El grafico 4.02, nos muestra el porcentaje de unidades de muestra con un comportamiento de pavimento bueno o malo, esto debido al radio de curvatura presente en algunas muestras, que sobrepasaron el valor establecido por el CONREVIAl de 100 metros, lo que diferenciaba entre un comportamiento bueno del pavimento o un comportamiento malo.

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

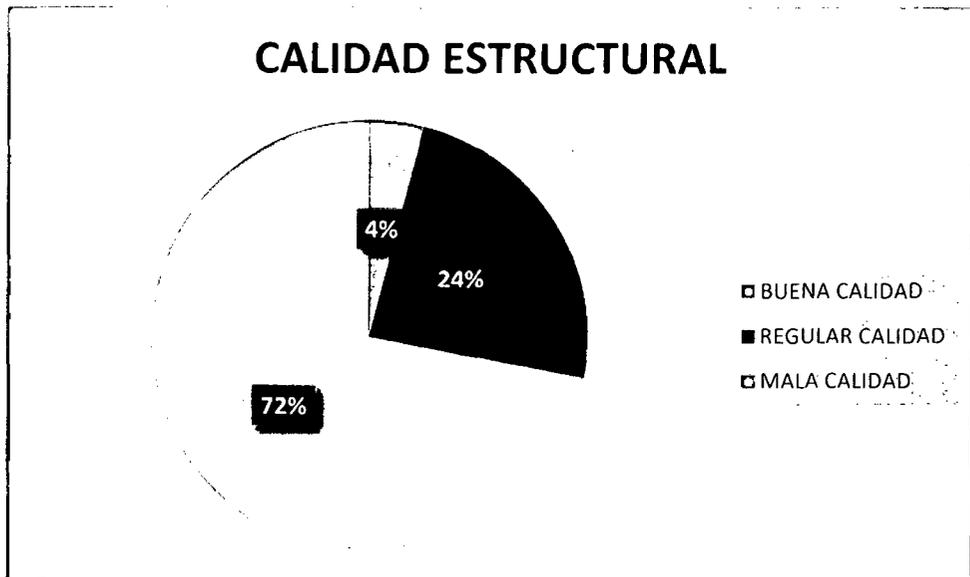
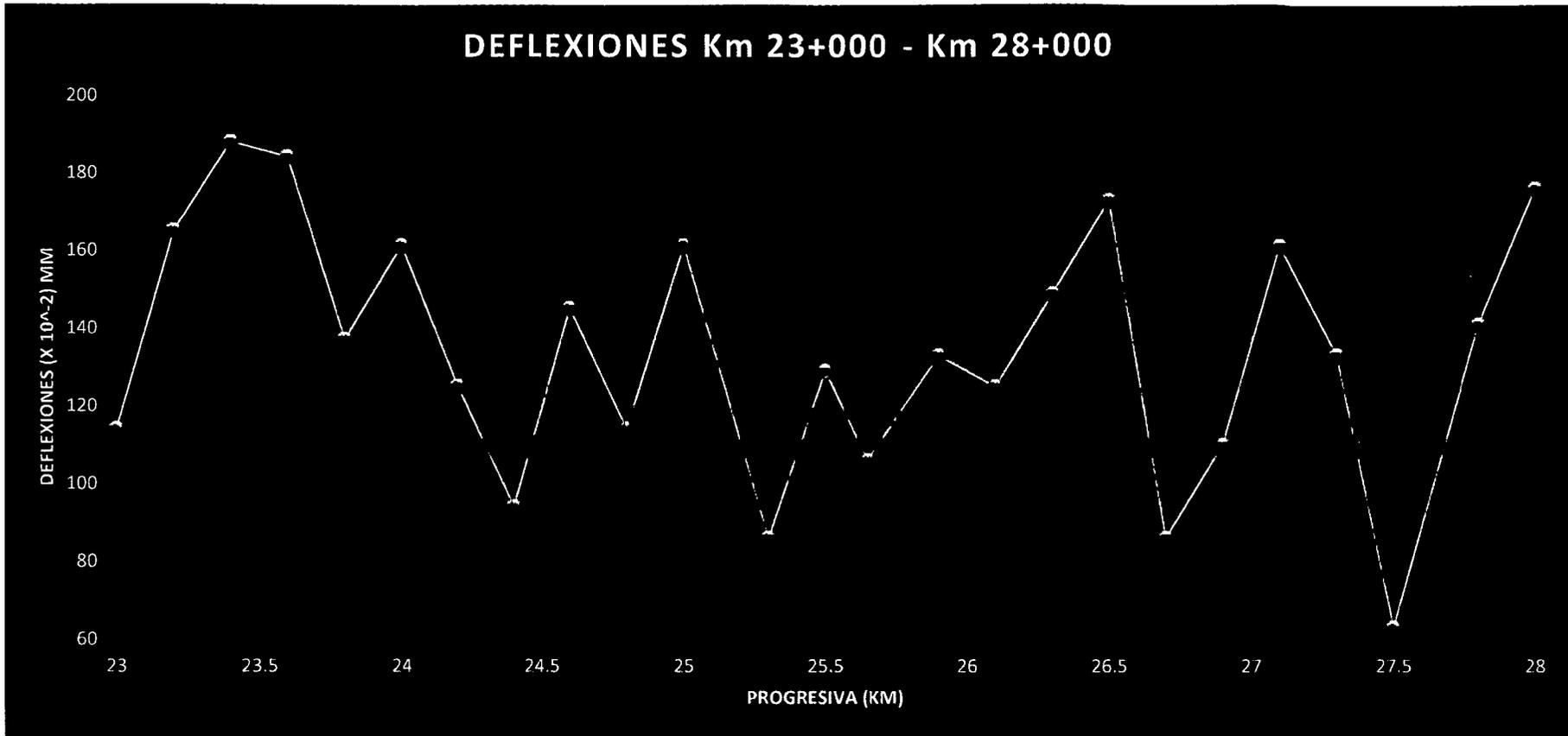


Figura 4.03. Porcentaje de unidades de muestra con una calidad estructural de pavimento bueno, regular o malo, de la carretera San Pablo – San Miguel, tramo Sunuden – San Miguel.

El gráfico 4.04, nos muestra el deflectograma presente en la vía de estudio, notándose así grandes picos de deflexión, los cuales en su mayoría (76%) sobrepasan el valor admisible de deformación formulado por el CONREVIAl (ecuación 07, $D_{adm} = 108 \times 10^{-2} \text{ mm}$).

Las causas asociadas a esta desviación (33.47), vendrían a ser, que el pavimento en estudio presenta zonas en donde el deterioro de su paquete estructural ha sido más acelerado que en otras zonas de estudio, esto debido a algunas zonas de deslizamiento las cuales producen un desestabilización en el suelo de fundación. Así como la pérdida parcial o total de la carpeta de rodadura en otras zonas de la vía, lo cual producirá la exposición de la base, perdiendo así su capacidad estructural.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.04. Deflectograma km 23+000 - km 28+000 de la carretera San Pablo – San Miguel, tramo Sunuden – San Miguel.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.CONCLUSIONES

- Se ha determinado el comportamiento estructural de las capas del Pavimento flexible de la carretera San Miguel – San Pablo, tramo San Miguel – Sunuden, mediante el análisis deflectométrico. Indicándonos que dicha carretera presenta actualmente un comportamiento estructural de mala calidad. Debido a que la deflexión promedio (137.12×10^{-2} mm) es mayor a la deflexión admisible (108×10^{-2} mm). Por lo que no se garantiza una estructura de comportamiento satisfactorio.
- Se realizó el análisis deflectométrico del pavimento flexible de la carretera San Miguel – San Pablo, tramo San Miguel – Sunuden. el cual consta con una longitud de 5,000 metros lineales. Se inspeccionaron un total de 25 unidades de muestra obteniendo los siguientes resultados (ver gráfico 5.01).

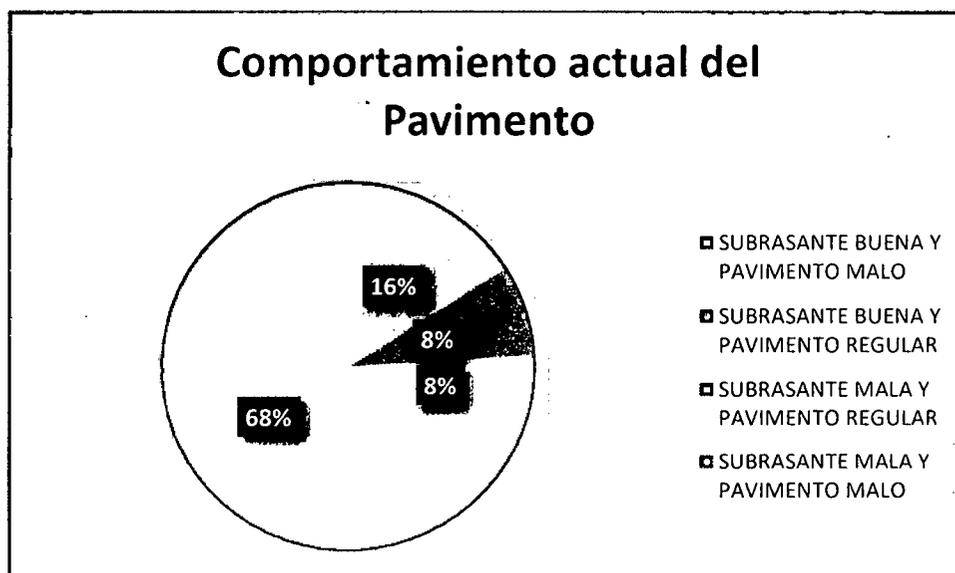


Figura 5.01. Porcentaje de unidades de muestra con estado de pavimento y estado de subrasante en la carretera San Pablo – San Miguel, tramo Sunuden – San Miguel.

- Se ha determinado que el 68% de muestras poseen un mal comportamiento actual de subrasante y un mal comportamiento de pavimento, ya que presentan un radio de curvatura pequeño (menor a 100 metros), y una deflexión grande (mayor a la deflexión admisible, 108×10^{-2} mm).

- Se ha determinado que el 16% de muestras poseen un buen comportamiento de la subrasante y un mal comportamiento del pavimento, ya que presentan un radio de curvatura pequeño (menor a 100 metros), y una deflexión pequeña (menor a la deflexión admisible, 108×10^{-2} mm). Esto debido a un espesor de las capas del pavimento insuficientes o un alto grado de deterioro de dichas capas, las cuales ya no cumplen con los estándares de calidad solicitados (en granulometría, compactación, CBR).
- Se ha determinado que el 8% de muestras poseen un buen comportamiento de la subrasante y un regular comportamiento del pavimento, ya que presentan un radio de curvatura mediana (igual a 100 metros), y una deflexión pequeña (menor a la deflexión admisible, 108×10^{-2} mm). Esto debido a que presentan un pavimento con sus capas en regular estado de deterioro, además de una subrasante que posee materiales que cumplen con la calidad solicitada en el diseño.
- Se ha determinado que el 8% de muestras poseen un mal comportamiento de la subrasante y un regular comportamiento del pavimento, ya que presentan un radio de curvatura mediana (igual a 100 metros), y una deflexión grande (mayor a la deflexión admisible, 108×10^{-2} mm). Esto debido a que presentan un pavimento con sus capas en Regular estado de Deterioro, pero una subrasante que posiblemente no fue bien compactada durante la etapa de construcción.
- Se determinó el valor admisible de deflexión del pavimento flexible de la carretera San Miguel – San Pablo, tramo San Miguel – Sunuden, obteniéndose un valor de 1.08 milímetros, para el cual se garantiza una estructura de comportamiento satisfactorio.
- Las principales fallas que se producen en el pavimento están asociadas a las deformaciones excesivas a nivel de la sub rasante, reflejando así el comportamiento del terreno de fundación y la deformación por tracción, asociado al agrietamiento de la carpeta de rodadura.

5.2.RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar mediciones de deflexiones intermedias (D60, D100) que permitan definir un mejor cuenco de deflexiones con el fin de obtener parámetros de diseño esenciales en la capacidad estructural del pavimento tales como el modulo efectivo del pavimento (E_o) y el módulo resiliente (M_r) lo cual puede realizarse mediante la ampliación a la metodología Hogg.
- Se recomienda realizar la calibración de los equipos a usar (deformimetro, viga Benkelman), ya que un equipo bien calibrado, nos brindara medidas reales, lo cual se verá reflejado en una buena toma de decisiones de mantenimiento.
- Se recomienda a las entidades del sector encargado de la administración de vías MTC, Concesionarios, deberían realizar monitoreo de deflexiones periódicos con la finalidad de prevenir los periodos de mantenimiento, que son reflejados en costo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANEXO 1

MTC E 1002-2000

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

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

MTC E 1002 – 2000

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

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

1. OBJETIVO

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

2. APARATO

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

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

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

2.2 Un camión para ensayo con las siguientes características.

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

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

3. PROCEDIMIENTO

3.1 El punto del pavimento a ser ensayado deberá ser marcado convenientemente con una línea transversal al camino. Sobre dicha línea será localizado el punto de ensayo a una distancia prefijada del borde. Se recomienda utilizar las distancias indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1

| Ancho del carril | Distancia del punto de ensayo desde el borde del pavimento |
|------------------|--|
| 2,70 m | 0,45 m |
| 3,00 m | 0,60 m |
| 3,30 m | 0,75 m |
| 3,60 m o más | 0.90 m |

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

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

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

3.5 Se ajustan a los diales de modo que sus vástagos tengan un recorrido libre comprendido entre 4 y 6 mm. Se giran las esferas de los diales hasta que las agujas queden en cero y se verifica la lectura

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

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

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

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

Límite inferior : 5 °C

Límite superior: 35 °C

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

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

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

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

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

4. CÁLCULOS

4.1 La deflexión bajo el eje de la carga (D_0), se calcula mediante la expresión:

$$D_0 = 4 \times L_0. \text{ (Expresada en 0,01 mm)}$$

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

4.2 La deflexión a 25 cm del eje de la carga (D_{25}), se calcula con la expresión:

$$D_{25} = 4 \times L_{25} \text{ (expresada en 0.01 mm).}$$

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

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

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

5. INFORME

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

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

6. REFERENCIAS NORMATIVAS

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

ANEXO 2

ESTUDIO DE TRAFICO DE LA CARRETERA SUNUDEN – SAN MIGUEL

"Determinación del Comportamiento Estructural del Pavimento Flexible de la carretera San Miguel – San Pablo, tramo San Miguel – Sunuden; mediante el Análisis Deflectométrico"

CLASIFICACIÓN DIARIA POR SENTIDO (CIFRAS ABSOLUTAS)

CARRETERA SUNUDEN - SAN MIGUEL

PUNTO: SAN MIGUEL Km 28 + 000

| DÍA | SENTIDO | VEHÍCULOS LIGEROS (AC) | CAMIÓN 2 EJES (C2) | CAMIÓN 3 EJES (C3) | BUS 2 EJES (B2) | BUS 3 EJES (B3-1) | TOTAL |
|-----------|----------------------|------------------------|--------------------|--------------------|-----------------|-------------------|-------|
| DOMINGO | SUNUDEN - SAN MIGUEL | 40 | 8 | 15 | 5 | 2 | 70 |
| | SAN MIGUEL - SUNUDEN | 40 | 8 | 15 | 5 | 2 | 70 |
| | AMBOS SENTIDOS | 80 | 16 | 30 | 10 | 4 | 140 |
| LUNES | SUNUDEN - SAN MIGUEL | 40 | 9 | 12 | 4 | 2 | 67 |
| | SAN MIGUEL - SUNUDEN | 38 | 9 | 12 | 4 | 2 | 65 |
| | AMBOS SENTIDOS | 78 | 18 | 24 | 8 | 4 | 132 |
| MARTES | SUNUDEN - SAN MIGUEL | 33 | 12 | 13 | 4 | 2 | 64 |
| | SAN MIGUEL - SUNUDEN | 33 | 12 | 13 | 4 | 2 | 64 |
| | AMBOS SENTIDOS | 66 | 24 | 26 | 8 | 4 | 128 |
| MIÉRCOLES | SUNUDEN - SAN MIGUEL | 34 | 11 | 12 | 4 | 0 | 61 |
| | SAN MIGUEL - SUNUDEN | 34 | 10 | 12 | 4 | 0 | 60 |
| | AMBOS SENTIDOS | 68 | 21 | 24 | 8 | 0 | 121 |
| JUEVES | SUNUDEN - SAN MIGUEL | 35 | 8 | 12 | 4 | 2 | 61 |
| | SAN MIGUEL - SUNUDEN | 35 | 8 | 12 | 4 | 2 | 61 |
| | AMBOS SENTIDOS | 70 | 16 | 24 | 8 | 4 | 122 |
| VIERNES | SUNUDEN - SAN MIGUEL | 37 | 11 | 8 | 5 | 2 | 63 |
| | SAN MIGUEL - SUNUDEN | 38 | 11 | 8 | 5 | 2 | 64 |
| | AMBOS SENTIDOS | 75 | 22 | 16 | 10 | 4 | 127 |
| SÁBADO | SUNUDEN - SAN MIGUEL | 40 | 12 | 5 | 4 | 0 | 61 |
| | SAN MIGUEL - SUNUDEN | 39 | 12 | 5 | 4 | 0 | 60 |
| | AMBOS SENTIDOS | 79 | 24 | 10 | 8 | 0 | 121 |
| PROMEDIO | SUNUDEN- SAN MIGUEL | 74 Veh/día | 20 Veh/día | 22 Veh/día | 9 Veh/día | 3 Veh/día | |

Elaboración Propia.

Fecha: Julio 2015

Se tiene la siguiente composición del tráfico

| COMPOSICIÓN DEL TRAFICO | |
|-------------------------|----|
| AC | 74 |
| B2 | 9 |
| B3-1 | 3 |
| C2 | 20 |
| C3 | 22 |

Calculo del Número de EALS en el carril de diseño.

a. Factor Direccional:

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

Factor direccional = 0.5

b. Factor Distribución Carril:

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

Factor Distribución Carril = 1

c. Tasa de Crecimiento:

Debido a que nuestro diseño está proyectado a un periodo de diseño de 20 años, tomando una tasa de crecimiento vehicular de 3%, tenemos:

$$Fc = \frac{(1 + r)^p - 1}{r}$$

$$Fc = \frac{(1 + 0.03)^{20} - 1}{0.03}$$

$$Fc = 26.87$$

d. Factor Equivalencia:

Corresponde al número de aplicaciones de ejes simple de 18,000 libras aportadas por el paso de un eje.

| EJE TIPO | | F.E. |
|------------------|---------------|----------------|
| TONELADAS | LIBRAS | |
| 1 | 2200 | 0.00037 |
| 7 | 15400 | 0.544 |
| 11 | 24200 | 3.136 |
| 16 | 35200 | 1.271 |
| 18 | 39600 | 2.004 |

e. Cálculo Trenes de Carga de los diferentes tipos de Vehículos

| TABLA DE PESOS Y MEDIDAS | | | | | |
|--------------------------|---|-------------------|-------------------|-----------|----------------------------|
| Veh. | Descripción Grafica | Long. Max. (m) | Peso Máximo (Ton) | | Peso Bruto Máximo (Ton) |
| | | | Ej. Del. | Ej. Post. | |
| Ac |  | | 1 | 1 | 2 |
| B2 |  | 13.20 | 7 | 11 | 18 |
| B3-1 |  | 14.00 | 7 | 16 | 23 |
| C2 |  | 12.30 | 7 | 11 | 18 |
| C3 |  | 13.20 | 7 | 18 | 25 |

f. Cálculo Número de Ejes por día:

| VEHÍCULO TIPO | VEH/DÍA | EJES | | | | |
|------------------|---------|---------|-------|--------|--------|--------|
| | | SIMPLES | | | TÁNDEM | |
| | | 1 TON | 7 TON | 11 TON | 16 TON | 18 TON |
| AC | 74 | 148 | - | - | - | - |
| B2 | 9 | - | 9 | 9 | - | - |
| B3-1 | 3 | - | 3 | - | 3 | - |
| C2 | 20 | - | 20 | 20 | - | - |
| C3 | 22 | - | 22 | - | - | 22 |
| | | 148 | 54 | 29 | 3 | 22 |

g. Cálculo de Número de EALS en el Carril de Estudio:

| TIPO DE EJE | EJES/DÍA | EJES/AÑO | F.E. | D.D. | D.L. | F.C. | # EALS |
|----------------|----------|----------|---------|------|------|----------------|-------------------|
| 1 TON | 148 | 54020 | 0.00037 | 0.5 | 1 | 26.87 | 268.53072 |
| 7 TON | 54 | 19710 | 0.544 | 0.5 | 1 | 26.87 | 144053.29 |
| 11 TON | 29 | 10585 | 3.136 | 0.5 | 1 | 26.87 | 445968.91 |
| 16 TON | 3 | 1095 | 2.004 | 0.5 | 1 | 26.87 | 29481.495 |
| 18 TON | 22 | 8030 | 2.004 | 0.5 | 1 | 26.87 | 216197.63 |
| | | | | | | N° EALS | 835,969.87 |

ANEXO 3

ESTUDIO DE SUELOS DE LA CARRETERA SUNUDEN – SAN MIGUEL

ESTUDIO DE SUELOS DE LA SUBRASANTE DE LA CARRETERA SAN PABLO – SAN MIGUEL, TRAMO SUNUDEN – SAN MIGUEL

1. UBICACIÓN

La zona en estudio corresponde al tramo de la carretera La Conga (San Pablo) – San Miguel de Pallaques (San Miguel), que une las localidades de **Sunudén (Km. 23 + 000)** y **San Miguel de Pallaques (Km. 28 +000)**

La calicata en estudio será denominada como Calicata N° 01 (C1), la cual se encuentra ubicada en la provincia de San Miguel, en el distrito de San Miguel de Pallaques. Kilómetro 23+000 de la carretera San Pablo – San Miguel.

- Este : 735 608 E
- Norte : 9 223 333 N
- Altitud : 2,267 m.s.n.m

2. ENSAYOS DE LABORATORIO

A fin de determinar las características físicas del suelo de subrasante se realizaron los siguientes ensayos:

| | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|--------------|
| Análisis Granulométrico | AASHTO T 88 | ASTM D 422 | MTC E 204 |
| Límites Consistencia | AASHTO T 89 | ASTM D 4318 | MTC E110/111 |
| Contenido Humedad | | ASTM D 2216 | MTC E 108 |

2.1. CONTENIDO DE HUMEDAD (ASTM D 2216)

- **Peso Muestra Húmeda** : 240.6gr
- **Peso Tara** : 26.2gr
- **Peso Muestra Seca** : 219.2gr

$$\% \text{ Humedad} = \frac{PMH - PMS}{PMS} * 100$$

- **% Humedad** : 9.76%

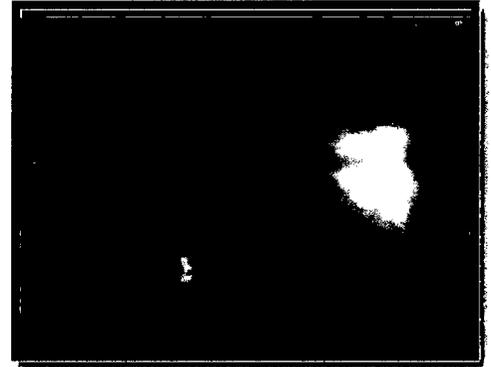


Figura A3.01. Muestra secada en el Horno

2.2. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM D 422)

Se tomó una muestra obtenida de la calicata N°01 (C1), para luego ser llevado al Horno para su secado por 24 horas, para luego ser pesado

- **W i húmedo** : 500gr.
- **W i seco** : 443.35gr.

Se procedió a su lavado, para eliminar partículas finas que pasaran el tamiz N° 200, para luego ser llevado al horno para su secado por 24 horas, para luego ser pesado.

- **W f seco** : 63.4gr.

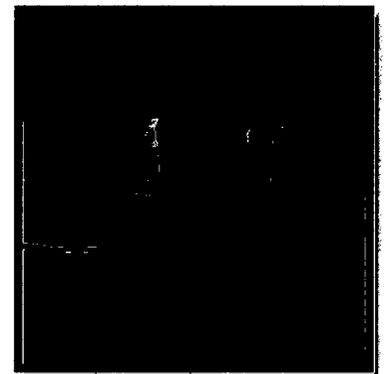


Figura A3.02. Peso de muestra inicial

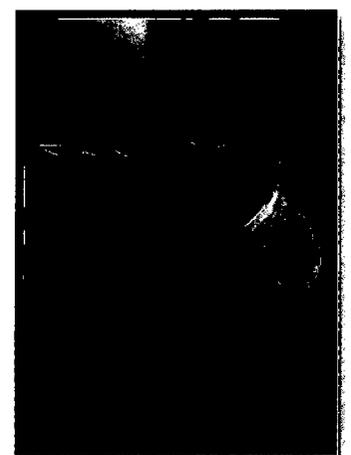


Figura A3.03. Lavado de muestra

- Granulometría por Lavado:

| TAMIZ | ABERTURA (mm) | PESO RETENIDO (gr) |
|----------|---------------|--------------------|
| | | |
| N° 4 | 4.760 | 0.30 |
| N° 10 | 2.000 | 4.20 |
| N° 20 | 0.840 | 8.20 |
| N° 30 | 0.590 | 5.20 |
| N° 40 | 0.420 | 5.40 |
| N° 60 | 0.250 | 10.80 |
| N° 100 | 0.149 | 13.00 |
| N° 200 | 0.074 | 15.10 |
| Cazoleta | | 381.15 |

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso Material Retenido en Tamiz}}{\text{Peso total de la Muestra}} \times 100$$

$$\% \text{ Pasa} = 1 - \% \text{ Retenido}$$

| TAMIZ | ABERTURA (mm) | PESO RETENIDO (gr) | PORCENTAJE RETENIDO | PORCENTAJE ACUMULADO | PORCENTAJE QUE PASA |
|----------|---------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | | | | | |
| N° 4 | 4.76 | 0.3 | 0.07% | 0.07% | 99.93% |
| N° 10 | 2 | 4.2 | 0.95% | 1.01% | 98.99% |
| N° 20 | 0.84 | 8.2 | 1.85% | 2.86% | 97.14% |
| N° 30 | 0.59 | 5.2 | 1.17% | 4.04% | 95.96% |
| N° 40 | 0.42 | 5.4 | 1.22% | 5.26% | 94.74% |
| N° 60 | 0.25 | 10.8 | 2.44% | 7.69% | 92.31% |
| N° 100 | 0.149 | 13 | 2.93% | 10.62% | 89.38% |
| N° 200 | 0.074 | 15.1 | 3.41% | 14.03% | 85.97% |
| Cazoleta | - | 381.15 | 85.97% | 100.00% | 0.00% |
| Σ | | 443.35 | | | |

CURVA GRANULOMETRICA

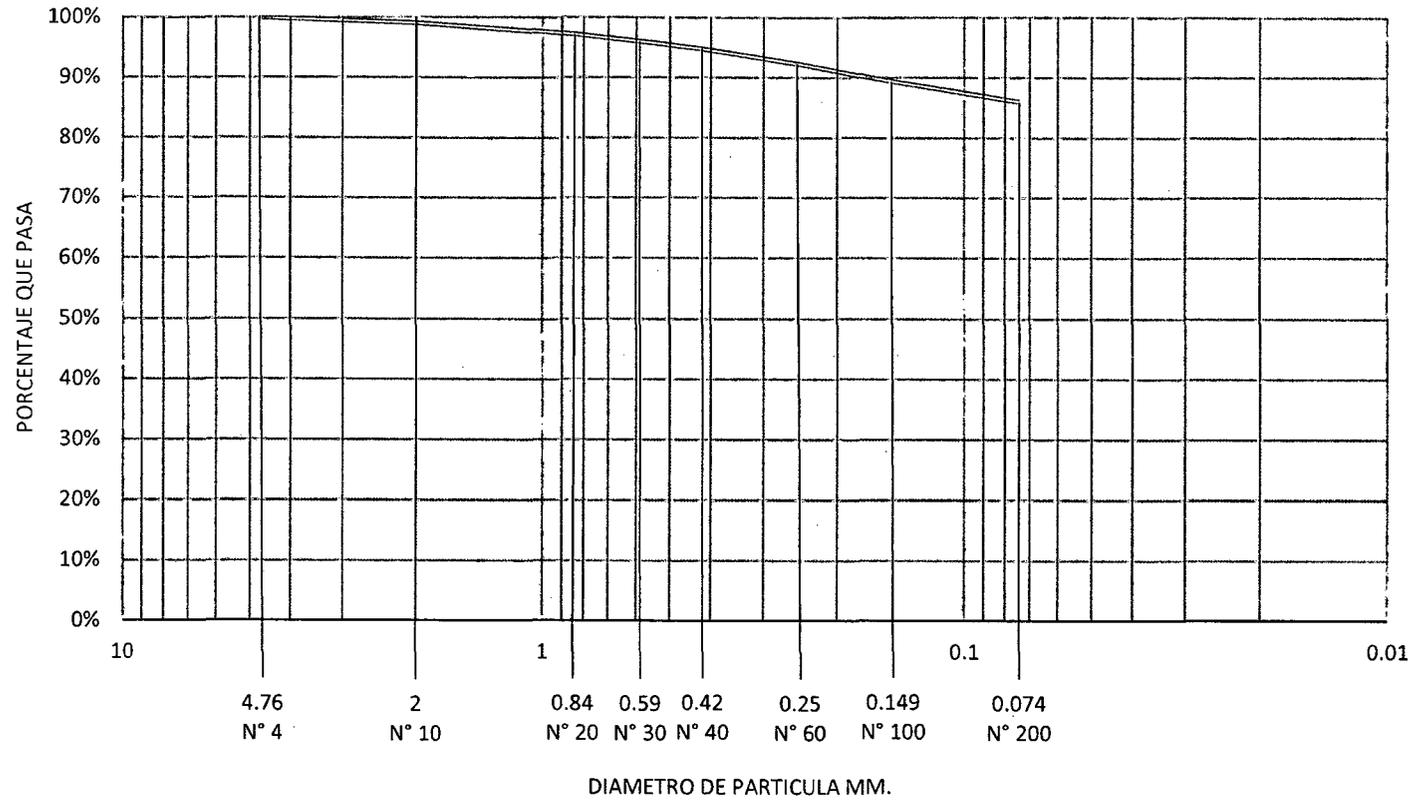


Figura A3.04. Curva granulométrica

2.3.LIMITE LÍQUIDO:

El limite liquido de un suelo es determinado por medio de la copa Casagrande (Designación de prueba D-4318 de la ASTM) y se define como el contenido de agua con el cual se cierra una ranura de 12.7 mm, mediante 25 golpes.

Se tomó una muestra obtenida de la calicata N°01 (C1), para luego ser secada al aire, para luego ser pasado por el tamiz N° 40, para luego ser ensayado.

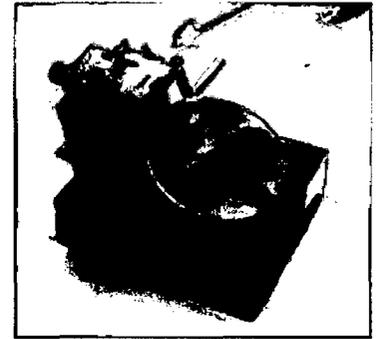


Figura A3.05. Muestra a ensayar en la copa Casagrande

| TARA NUMERO | 1 | 2 | 3 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|
| PESO DE SUELO HÚMEDO + TARA | 44.9 | 37.7 | 39.2 |
| PESO DE SUELO SECO + TARA | 39.9 | 34.6 | 35.6 |
| PESO DE TARA | 29.4 | 27.1 | 27.5 |
| PESO DE SUELO SECO | 10.5 | 7.5 | 8.1 |
| PESO DEL AGUA | 5 | 3.1 | 3.6 |
| CONTENIDO DE HUMEDAD, % | 47.62% | 41.33% | 44.44% |
| NUMERO DE GOLPES, N | 14 | 36 | 24 |

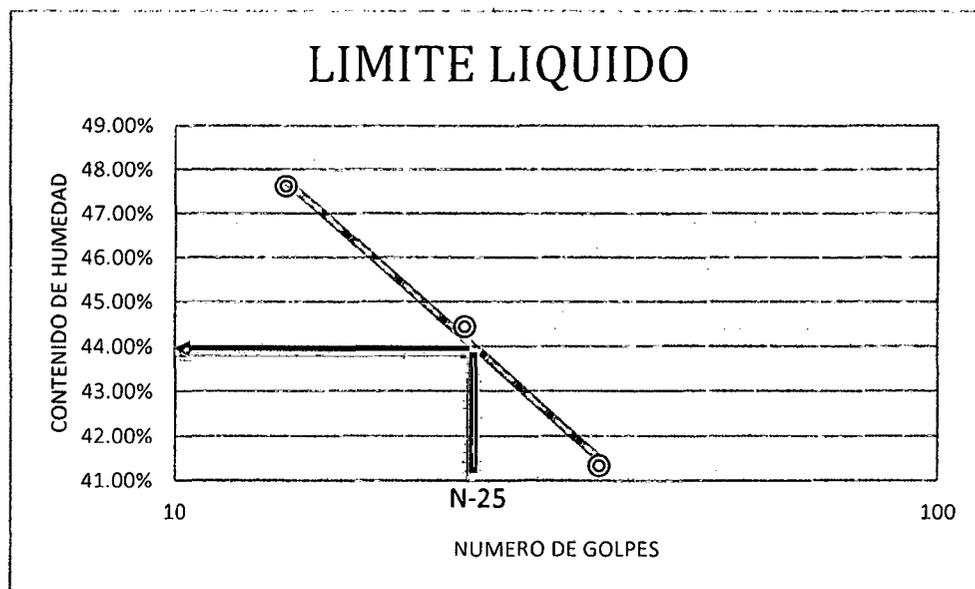


Figura A3.06. Limite líquido.

- **Limite Liquido = 44 %**

2.4.LIMITE PLÁSTICO:

El límite plástico se define como el contenido de agua con el cual el suelo se agrieta al formarse un rollito de 3.18 mm de diámetro (designación de prueba D-4318 de la ASTM).

| | 1 | 2 |
|--|------|------|
| | 32.8 | 31.4 |
| | 31.9 | 30.7 |
| | 27.2 | 26.8 |
| | 4.7 | 3.9 |
| | 0.9 | 0.7 |
| | 19% | 18% |

- **Límite Plástico = 19%**

La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo se define como índice de plasticidad (PI)

- **Índice Plástico = 25%**

2.5.ÍNDICE DE GRUPO

Para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para subrasante de un camino, se desarrolló también un número denominado índice de grupo. Entre mayor es el valor del índice de grupo para un suelo, será menor el uso del suelo como subrasante. Un índice de grupo de 20 o más indica un material muy pobre para ser usado.

$$GI = (F200 - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F200 - 15)(PI - 10)$$

Donde:

F200 : por ciento que pasa la malla N° 200

LL : Límite líquido

PI : Índice de plasticidad

$$GI = (85 - 35) * (0.2 + 0.005 * (44 - 40)) + 0.01 * (85 - 15) * (25 - 10)$$

$$GI = 22$$

2.6.CLASIFICACIÓN DE SUELOS

La muestra de suelo obtenida de la calicata N°1 (C1), de acuerdo a la granulometría y límites de Atterberg obtenidos. Haciendo uso de la tabla N° A3.04, nos indica que se trata de un suelo arcilloso (Clasificación AASHTO: A - 7 - 6 (22))

2.7.RESULTADOS:

- **CALICATA C-25 (km 23 + 300)**

De 0.25 m. a 1.50 m. de profundidad presenta un estrato conformado por limo inorgánico, de baja compresibilidad (Clasificación AASTHO: A-4). Se encuentra poco consolidado y muy húmedo.

- **CALICATA C-25A (km 23 + 800)**

De 0.20 m. a 1.50 m. de profundidad presenta un estrato conformado por limo inorgánico, de baja compresibilidad (Clasificación AASTHO: A-4). Se encuentra poco consolidado y poco húmedo.

- **CALICATA C-26 (km 24 + 300)**

De 0.25 m. a 1.50 m. de profundidad presenta un estrato conformado por arcilla inorgánica, de mediana plasticidad (Clasificación AASTHO: A-7-5). Se encuentra poco consolidado y muy húmedo.

- **CALICATA C-26A (km 24 + 800)**

De 0.20 m. a 1.50 m. de profundidad presenta un estrato conformado por limo inorgánico, de baja compresibilidad (Clasificación AASTHO: A-4). Se encuentra poco húmedo y poco consolidado.

- **CALICATA C-27 (km 25 + 300)**

De 0.25 m. a 1.50 m. de profundidad presenta un estrato conformado por arcilla inorgánica, de alta plasticidad (Clasificación AASTHO: A-7-5). Se encuentra poco consolidado y muy húmedo.

- **CALICATA C-27A (km 25 + 800)**

De 0.20 m. a 1.50 m. de profundidad presenta un estrato conformado por una mezcla pobremente gradada (Clasificación AASTHO: A-2-4). Se encuentra poco húmedo y poco consolidado.

- **CALICATA C-28 (km 26 + 300)**

De 0.20 m. a 1.50 m. de profundidad presenta un estrato conformado por limo inorgánico, de baja compresibilidad (Clasificación AASTHO: A-4). Se encuentra poco consolidado y muy húmedo.

- **CALICATA C-28A (km 26 + 800)**

De 0.20 m. a 1.50 m. de profundidad presenta un estrato conformado por limo inorgánico, de baja compresibilidad (Clasificación AASTHO: A-4). Se encuentra poco consolidado y poco húmedo.

- **CALICATA C-29 (km 27 + 300)**

De 0.25 m. a 1.50 m. de profundidad presenta un estrato conformado por arcilla inorgánica, de mediana plasticidad (Clasificación AASTHO: A-6). Se encuentra poco consolidado y muy húmedo.

- **CALICATA C-29A (km 27 + 800)**

De 0.20 m. a 1.50 m. de profundidad presenta un estrato conformado por limo inorgánico, de baja compresibilidad (Clasificación AASTHO: A-4). Se encuentra poco consolidado y poco húmedo.

| CLASIFICACIÓN GENERAL | MATERIALES GRANULARES (<35% PASA Nº 200) | | | | | | | MATERIALES ARCILLOSOS (>35% PASA Nº 200) | | | | |
|--|--|---------|-------------|------------------------------------|---------|---------|---------|--|---------|-------------------|----------|----------|
| | A-1 | | A-3 | A-2 | | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 | |
| SUB GRUPOS | A-1a | A-1b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 | | | | A-7-5 | A-7-6 |
| PORCENTAJE QUE PASA EL TAMIZ | | | | | | | | | | | | |
| Nº 10 | máx 50% | | | | | | | | | | | |
| Nº 40 | máx 30% | máx 50% | mín 51% | | | | | | | | | |
| Nº 200 | máx 15% | máx 25% | máx 10% | máx 35% | máx 35% | máx 35% | máx 35% | mín 36% | mín 36% | mín 36% | mín 36% | |
| CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ Nº 40 | | | | | | | | | | | | |
| LÍMITE LÍQUIDO | | | No Plastico | máx 40% | mín 41% | máx 40% | mín 41% | máx 40% | mín 41% | máx 40% | mín 41% | |
| ÍNDICE DE PLASTICIDAD | máx 6% | máx 6% | | máx 10% | máx 10% | mín 11% | mín 11% | máx 10% | máx 10% | mín 11% | | |
| | | | | | | | | | | | IP<LL-30 | IP>LL-30 |
| ÍNDICE DE GRUPO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | máx 4% | máx 4% | máx 8% | máx 12% | máx 16% | máx 20% | |
| TIPO DE MATERIAL | Fragmentos de piedra, arena y grava | | arena fina | grava, arenas limosas y arcillosas | | | | suelos limosos | | suelos arcillosos | | |

Tabla Nº A3.04. Sistema AASHTO de clasificación de suelos

ANEXO 4

NORMA ASTM – 4695

ANEXO 5

FOTOGRAFÍAS DE UNIDADES DE MUESTRA

FOTOGRAFÍAS DE UNIDADES DE MUESTRA



Figura A5.01. Vista de la Estructura del Pavimento en Estudio.



Figura A5.02. Toma de muestra de la Subrasante, para Estudio de Suelos.



Figura A5.03. Toma de medida de la Carpeta Asfáltica.



Figura A5.04. Base Granular Mejorada con Asfalto.



Figura A5.05. Calibración de la Viga Benkelman, para proceder a la toma de Deflexiones.

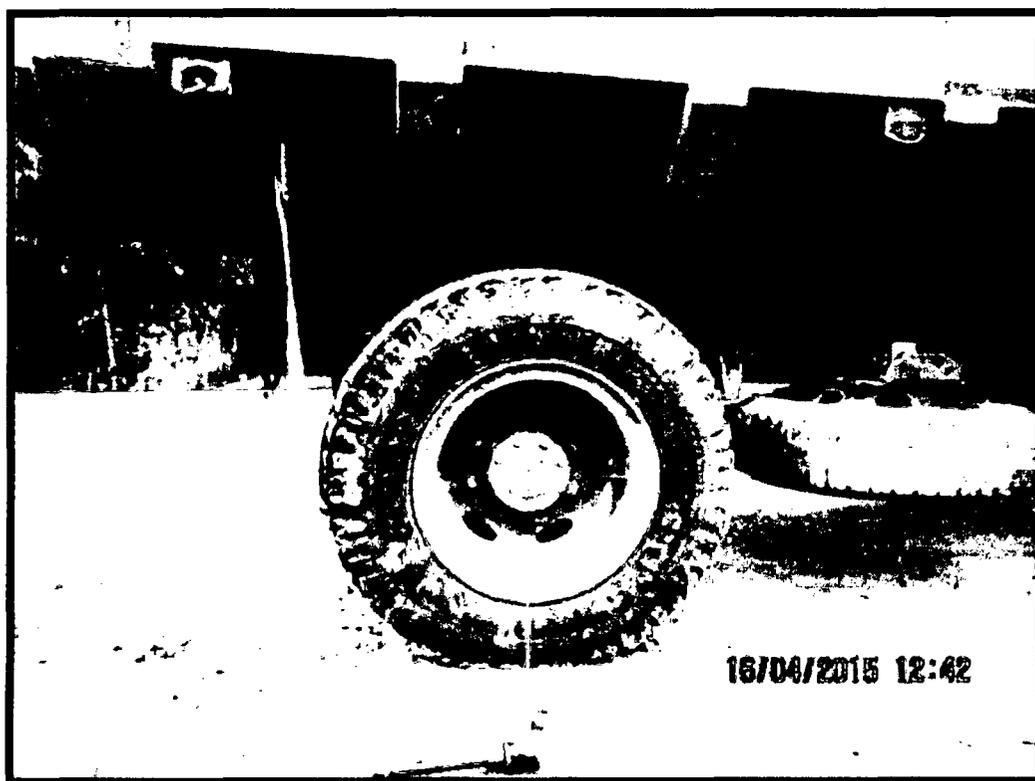


Figura A5.06. Medida de la Temperatura del Pavimento.



Figura A5.07. Toma de la Unidad de Muestra U-25 – Km 28+000.



Figura A5.08. Vista de la Unidad de Muestra U-19 – Km 26+700.



Figura A5.09. Vista de la Unidad de Muestra U-15 – Km 25+900.



Figura A5.10. Toma de la Unidad de Muestra U-01 – Km 23+000.

ANEXO 6

CALIBRACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN

CERTIFICADO DE CALIBRACION
N° 14031403

SOLICITANTE: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ATENCION : UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

**TITULO : Verificación de Dial Comparador de Viga
Benkelman**

VIGA BENKELMAN

Marca : ORION
Relación de Pivote 4:1
N° Serie : 14031403

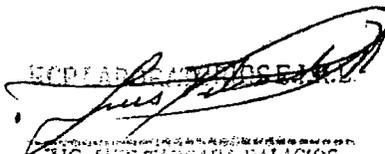
BRAZO NEGRO N° 01

Dial : Mitutoyo
N° Serie : SKW316
Aprox. : 0.01 mm/div.
Modelo : 2046S

BRAZO ROJO N° 02

Dial : Mitutoyo
N° Serie : SKW313
Aprox. : 0.01 mm/div.
Modelo : 2046S

FECHA : Huachipa, 23 de Octubre del 2014


ING. LUIS TABOADA PALACIOS
Jefe de Laboratorio
CIP 56551

VERIFICACION

1.- GENERALIDADES

A solicitud de UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA. se procedió a verificar el comportamiento del los Diales Comparadores de la Viga Benkelman. La verificación se efectuó el día 23 de Octubre del 2014.

2.- DEL SISTEMA A VERIFICAR

| | |
|--------------------------|-------------------------------|
| Dispositivo : | Dial de Viga Benkelman |
| Brazo Negro N° 01 | Brazo Rojo N° 02 |
| Marca : | Mitutoyo |
| Serie : | SKW 316 |
| Sensibilidad : | 0.01 mm/div. |

| | |
|---------------|--------------|
| Marca : | Mitutoyo |
| Serie : | SKW 313 |
| Sensibilidad: | 0.01 mm/div. |

3.- DEL SISTEMA DE CALIBRACIÓN

| | |
|--------------|--------------------|
| Dispositivo | : Dial Digital |
| Fabricante | : MITUTOYO (Japón) |
| Tipo | : 1D - C112M |
| Serie N° | : 12581 |
| Sensibilidad | : 0.001 mm. |

RCP LABORATORIOS E.I.R.L.
Luis Palacios
ING. LUIS TARRADA PALACIOS
Jefe de Laboratorio
CIP 56651

Calibrado con Tambor Micrométrico: DIAL GAGE TESTER UDT 280 – MITUTOYO CORPORATION con aproximación de 0.0001 mm; traceable al Sistema de Servicio de Medición del Japón (Certificados de Acreditación N° 0030, 0031, 0067, 0078); Calibración el 17.06.2014 por INDECOPI, Ultima Calibración realizado en el Laboratorio de Longitud y Angulo de INDECOPI – Certificado N° LLA-252-2014.

4.- PROCEDIMIENTO

Se determinó el error de indicación de los Diales por comparación con nuestro Patrón Digital. Se aplicaron tres series de medición al dial mediante el mismo mecanismo de desplazamiento. En cada serie se registraron las lecturas correspondientes.

5.- RESULTADOS

En la Tabla N° 1 se muestran las tres series de carga y la serie promedio correspondiente.

En el Gráfico N°1 se muestra la curva de regresión y la ecuación de ajuste correspondientes a la presente calibración.

6.- NOTA IMPORTANTE.

Posicionamiento de la Viga

- Con el manubrio posterior posicionar suavemente las medias lunas de los brazos en su punto de medición sobre el pavimento.
- Girar manubrio posterior 10 vueltas completas, para evitar pandeo del brazo y tener error de lectura.
- Continuar con el ensayo.

TABLA N° 1

VERIFICACION DE DIAL COMPARADOR - BRAZO NEGRO 01

Dial Marca MITUTOYO, N/S SKW 316, Mod. 2046S

Sensibilidad 0.01 mm/div

| DIAL COMPARADOR PATRON mm | LECTURA DIAL DE LA VIGA BENKELMAN RELACION DE BRAZO 4:1 | | | SERIE PROMEDIO mm | Recta de Ajuste (Y) mm |
|------------------------------|--|-------------------|-------------------|----------------------|---------------------------|
| | SERIE (1) mm | SERIE (2) mm | SERIE (3) mm | | |
| 0.100 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.100 |
| 0.200 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.200 |
| 0.400 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.400 |
| 0.600 | 0.149 | 0.149 | 0.149 | 0.149 | 0.596 |
| 0.800 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.800 |
| 1.000 | 0.250 | 0.250 | 0.250 | 0.250 | 1.000 |
| 1.200 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 1.200 |
| 1.400 | 0.350 | 0.350 | 0.350 | 0.350 | 1.400 |
| 1.600 | 0.400 | 0.400 | 0.400 | 0.400 | 1.600 |
| 1.800 | 0.450 | 0.450 | 0.450 | 0.450 | 1.800 |
| 2.000 | 0.500 | 0.500 | 0.500 | 0.500 | 2.000 |
| 2.500 | 0.625 | 0.625 | 0.625 | 0.625 | 2.500 |
| 3.000 | 0.750 | 0.750 | 0.750 | 0.750 | 3.000 |

coeficiente de correlación: $R^2 = 1$

Recta de ajuste: $Y = (1.0003x - 0.0007) * 4$

Donde:

X : Lectura del dial (mm)

Y : Calculo de la Deflexión

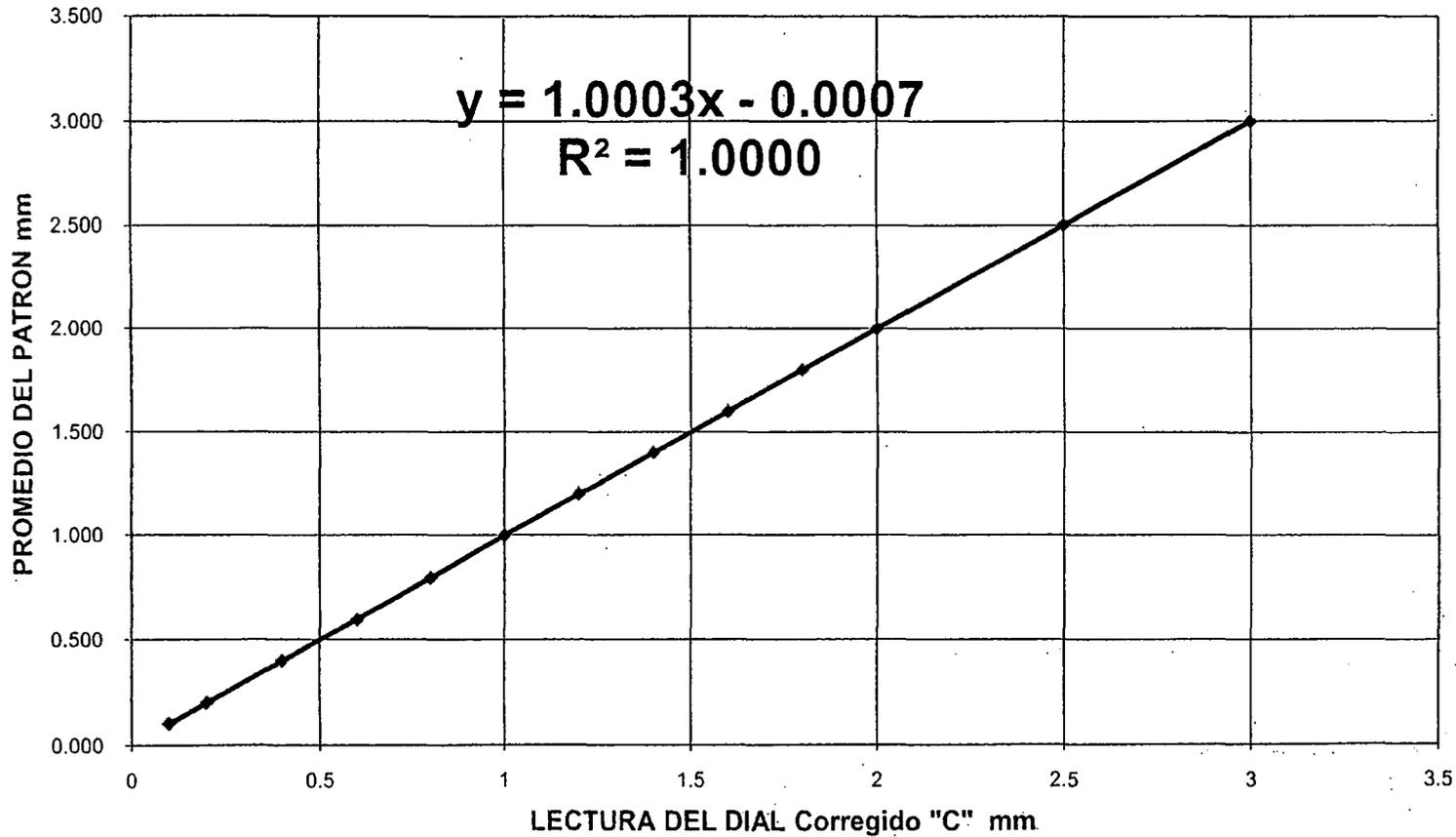
| Lect Dial Viga mm | Lect Corregida (Y) mm | Lect Dial Viga mm | Lect Corregida (Y) mm |
|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|
| 0.1 | 0.400 | 1.1 | 4.400 |
| 0.2 | 0.800 | 1.2 | 4.800 |
| 0.3 | 1.200 | 1.3 | 5.200 |
| 0.4 | 1.600 | 1.4 | 5.600 |
| 0.5 | 2.000 | 1.5 | 6.000 |
| 0.6 | 2.400 | | |
| 0.7 | 2.800 | | |
| 0.8 | 3.200 | | |
| 0.9 | 3.600 | | |
| 1.0 | 4.000 | | |

RCP LABORATORIOS E.I.R.L.
[Signature]
ING. LUIS TABATA PALACIOS
Jefe de Laboratorio
CIP 56551

RCP LABORATORIOS E.I.R.L.

ING. LUIS TAVARA PALACIOS
Laboratorio
CIP 56351

GRAFICO N° 1
VERIFICACION DE DIAL COMPARADOR - BRAZO N° 1
Dial Marca MITUTOYO, Mod. 2046S, N/S SKW 316
Sensibilidad 0.01 mm



RCP LABORATORIOS E.I.R.L.
SURTEO, CONCRETO Y ACERILLO
RUC: 20504653065

TABLA N° 2

VERIFICACION DE DIAL COMPARADOR - BRAZO ROJO N° 2

Dial Marca MITUTOYO, N/S SKW 313, Mod. 2046S

Sensibilidad 0.01 mm/div

| DIAL COMPARADOR PATRON mm | LECTURA DIAL DE LA VIGA BENKELMAN RELACION DE BRAZO 4:1 | | | SERIE PROMEDIO mm | A | C Lectura Relac. mm |
|------------------------------|--|-------------------|-------------------|----------------------|---|---------------------------|
| | SERIE (1) mm | SERIE (2) mm | SERIE (3) mm | | | |
| 0.10 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | | 0.100 |
| 0.20 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | | 0.200 |
| 0.40 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | | 0.400 |
| 0.60 | 0.145 | 0.145 | 0.145 | 0.145 | | 0.600 |
| 0.80 | 0.190 | 0.190 | 0.190 | 0.190 | | 0.800 |
| 1.00 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | | 1.000 |
| 1.20 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | | 1.200 |
| 1.40 | 0.345 | 0.345 | 0.345 | 0.345 | | 1.400 |
| 1.60 | 0.395 | 0.395 | 0.395 | 0.395 | | 1.600 |
| 1.80 | 0.440 | 0.440 | 0.440 | 0.440 | | 1.800 |
| 2.00 | 0.485 | 0.485 | 0.485 | 0.485 | | 2.000 |
| 2.50 | 0.620 | 0.620 | 0.620 | 0.620 | | 2.500 |
| 3.00 | 0.735 | 0.735 | 0.735 | 0.735 | | 3.000 |

coeficiente de correlación: $R^2 = 1$

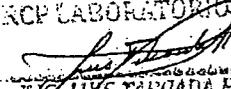
Recta de ajuste: $Y = (0.9834x - 0.0034) * 4$

Donde:

X : Lectura del dial (mm)

Y : Calculo de la Deflexión

| Lect Dial Viga mm | Lect Corregida (Y) mm | Lect Dial Viga mm | Lect Corregida (Y) mm |
|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|
| 0.10 | 0.395 | 1.20 | 3.240 |
| 0.20 | 0.795 | 1.30 | 3.520 |
| 0.30 | 1.195 | 1.40 | 3.800 |
| 0.40 | 1.595 | 1.50 | 4.080 |
| 0.50 | 1.995 | | |
| 0.60 | 2.395 | | |
| 0.70 | 2.795 | | |
| 0.80 | 3.195 | | |
| 0.90 | 3.595 | | |
| 1.00 | 3.995 | | |

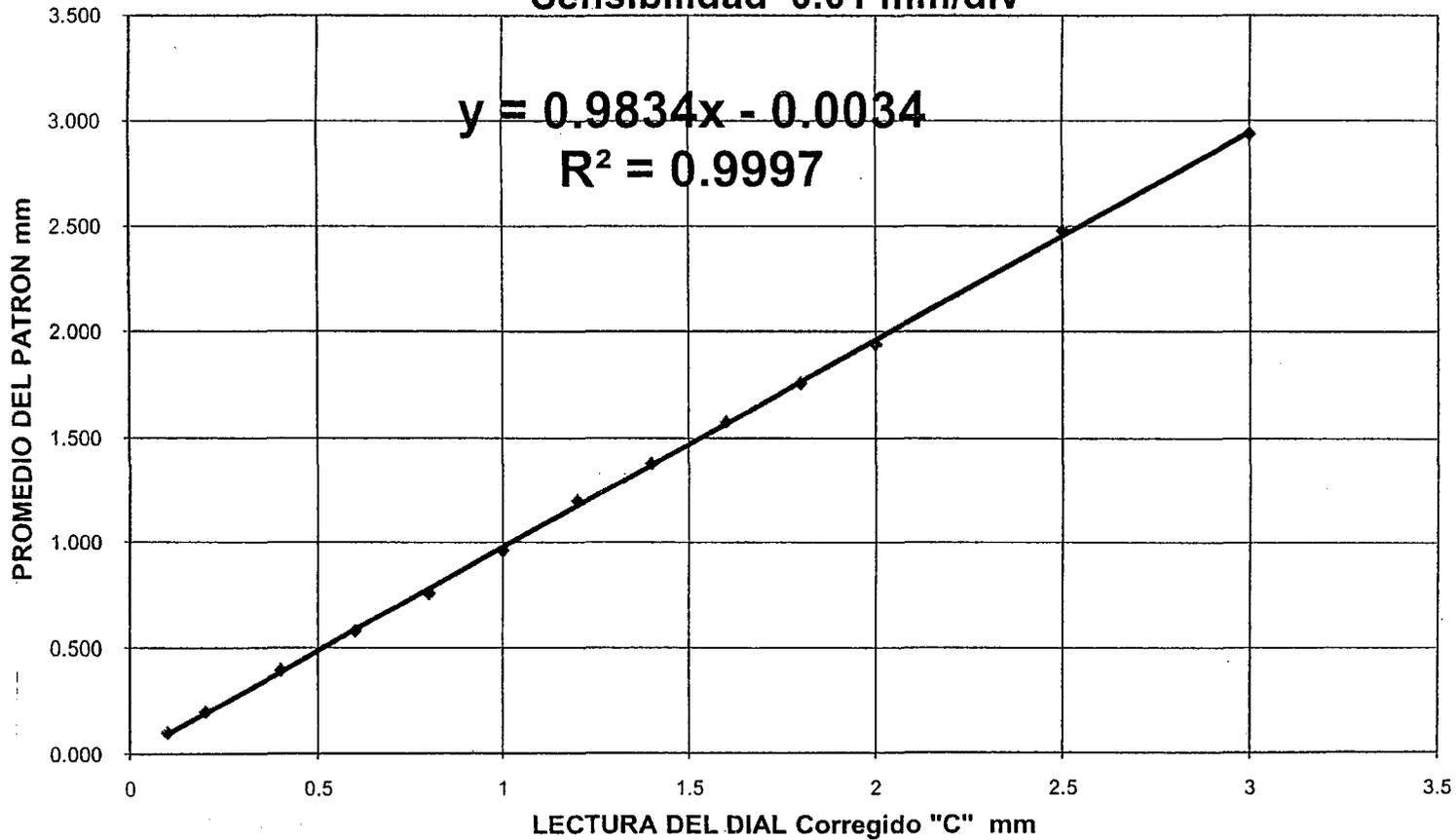
RCP LABORATORIOS E.I.R.L.

 ING. LUIS TABOADA PALACIOS
 Jefe de Laboratorio
 CIP 56551

MCP LABORATORIOS E.I.R.L.

[Signature]
ING. LUIS PALACIOS
Jefe de Laboratorio
CIP 56551

GRAFICO N° 2 VERIFICACION DE DIAL COMPARADOR - BRAZO ROJO N° 2

Dial Mitutoyo, Mod. 2046S, N/S SKW 313
Sensibilidad 0.01 mm/div



RCPI
LABORATORIOS E.I.R.L.
SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
RUC: 20504653065

ANEXO 7
PLANO DE UBICACIÓN