

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN



**“EVALUACIÓN DEL FENÓMENO DE AHUELLAMIENTO
CON RAYOS-X DE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA
EN PAVIMENTOS EN SERVICIO”**

Por:

GARCÍA ZAMBRANA HORACIO

Trabajo de grado presentado a consideración de la **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**, como requisito para optar el Grado Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Semestre I - 2022

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA:

El presente trabajo va dedicado con mucho amor y respeto a mis padres Manuel García y Renata Zambrana, quienes me brindaron constante apoyo y paciencia para poder cumplir mis metas en la vida.

A mis hermanos Roger y Rodrigo por sus consejos y ayuda brindada.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

| | Página |
|---|--------|
| 1.1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN | 2 |
| 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 3 |
| 1.3.1. Situación problemática..... | 3 |
| 1.3.2. Problema | 4 |
| 1.4. OBJETIVOS | 4 |
| 1.4.1. Objetivo general..... | 4 |
| 1.4.2. Objetivos específicos | 4 |
| 1.4.3. Hipótesis..... | 5 |
| 1.4.4. Definición de variables independientes y dependientes..... | 5 |
| 1.4.4.1. Variables independientes | 5 |
| 1.4.4.2. Variables dependientes..... | 5 |
| 1.4.4.3. Operacionalización de variables | 6 |
| 1.5. DISEÑO METODOLÓGICO..... | 7 |
| 1.5.1. Unidad de estudio..... | 7 |
| 1.5.2. Población..... | 7 |
| 1.5.3. Muestra..... | 7 |
| 1.5.4. Muestreo..... | 7 |
| 1.5.5. Procedimientos de aplicación..... | 11 |
| 1.5.6. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información | 17 |
| 1.5.7. Alcance..... | 21 |

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS Y SU EVALUACIÓN DE AHUELLAMIENTO POR IMÁGENES DE RAYOS-X

| | Página |
|---|--------|
| 2.1. PAVIMENTOS | 24 |
| 2.2. TIPOS DE PAVIMENTO..... | 25 |
| 2.2.1. Flexibles | 25 |
| 2.2.2. Articulados | 25 |
| 2.2.3. Rígidos | 26 |
| 2.3. PAVIMENTO FLEXIBLE | 26 |
| 2.4. FUNCIONES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE | 27 |
| 2.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE..... | 29 |
| 2.5.1. Ventajas..... | 29 |
| 2.5.2. Desventajas | 29 |
| 2.6. PARTES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE..... | 30 |
| 2.6.1. Carpeta de rodadura | 30 |
| 2.6.2. Base..... | 31 |
| 2.6.3. Subbase granular | 32 |
| 2.6.4. Terreno natural o subrasante | 33 |
| 2.7. DAÑOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES..... | 35 |
| 2.7.1. Fisuras y grietas..... | 35 |
| 2.7.1.1. Fisura piel de cocodrilo..... | 35 |
| 2.7.1.2. Fisura en bloque | 35 |
| 2.7.1.3. Fisuras en arco..... | 35 |
| 2.7.1.4. Fisura transversal | 36 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.7.1.5. | Fisura longitudinal | 36 |
| 2.7.1.6. | Fisura por reflexión de junta | 36 |
| 2.7.2. | Deformaciones superficiales de pavimentos flexibles | 36 |
| 2.7.2.1. | Ahuellamiento..... | 36 |
| 2.7.2.2. | Corrimiento | 36 |
| 2.7.2.3. | Corrugación..... | 37 |
| 2.7.2.4. | Hinchamiento | 37 |
| 2.7.2.5. | Hundimiento..... | 37 |
| 2.7.3. | Desintegración en los pavimentos flexibles | 37 |
| 2.7.3.1. | Bache..... | 37 |
| 2.7.3.2. | Peladura..... | 37 |
| 2.7.3.3. | Desintegración de bordes | 37 |
| 2.7.4. | Otros deterioros en los pavimentos flexibles | 38 |
| 2.7.4.1. | Exudación de asfalto | 38 |
| 2.7.4.2. | Descenso de la berma..... | 38 |
| 2.7.4.3. | Surgencia de finos y agua | 38 |
| 2.7.4.4. | Separación entre berma y pavimento | 38 |
| 2.8. | AHUELLAMIENTO | 38 |
| 2.9. | TIPOS DE AHUELLAMIENTO..... | 40 |
| 2.9.1. | Ahuellamiento en la capa asfáltica..... | 40 |
| 2.9.2. | Ahuellamiento producido en capas subyacentes..... | 40 |
| 2.10. | CAUSAS DEL AHUELLAMIENTO..... | 40 |
| 2.10.1. | Altas temperaturas..... | 42 |
| 2.10.2. | Cargas pesadas | 42 |
| 2.10.3. | Circulación a bajas velocidades | 42 |
| 2.10.4. | Efecto del grado asfáltico..... | 42 |
| 2.10.5. | Efecto del agregado..... | 43 |
| 2.10.6. | Propiedades volumétricas de la mezcla..... | 44 |

| | |
|--|----|
| 2.11. DETERMINACIÓN DEL AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS..... | 46 |
| 2.11.1. Equipos de alto rendimiento..... | 46 |
| 2.11.1.1. Perfilómetro láser..... | 46 |
| 2.11.1.2. Perfilómetro óptico..... | 48 |
| 2.11.1.3. Transverse profile logger (TPL)..... | 49 |
| 2.11.2. Equipos de bajo rendimiento..... | 50 |
| 2.11.2.1. Perfiles y reglas graduadas..... | 51 |
| 2.11.2.2. Perfilógrafo transversal..... | 52 |
| 2.11.2.3. Perfilómetro portátil..... | 53 |
| 2.12. TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS-X (TC-RX) PARA EVALUACIÓN DEL AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES..... | 53 |
| 2.12.1. Imágenes digitales generadas con tomografía computarizada | 57 |
| 2.12.2. Descripción del software ImageJ | 58 |

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS-X PARA EVALUACIÓN DE AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

| | |
|--|--------|
| | Página |
| 3.1. UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO..... | 59 |
| 3.2. EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS ASFÁLTICOS | 62 |
| 3.3. ALTURA DE AHUELLAMIENTO DE NÚCLEOS EXTRAÍDOS | 64 |
| 3.4. PESO VOLUMÉTRICO DE NÚCLEOS EXTRAÍDOS | 66 |
| 3.4.1. Peso volumétrico de núcleos con ahuellamiento | 68 |
| 3.4.2. Peso volumétrico de núcleos sin ahuellamiento..... | 69 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 3.5. | CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO DE NÚCLEOS EXTRAÍDOS | 70 |
| 3.5.1. | Contenido de ligante asfáltico de núcleos con ahuellamiento | 72 |
| 3.5.2. | Contenido de ligante asfáltico de núcleos sin ahuellamiento..... | 73 |
| 3.6. | ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE NÚCLEOS EXTRAÍDOS..... | 74 |
| 3.6.1. | Granulometría de núcleos de partes de pavimento ahuellados | 75 |
| 3.6.2. | Granulometría de núcleos de partes de pavimento no ahuellados | 78 |
| 3.6.3. | Gráficas granulométricas de tramos ahuellados y no ahuellados..... | 81 |
| 3.7. | APLICACIÓN DE TOMOGRAFÍAS COMPUTARIZADAS DE RAYOS-X (TC-RX) | 84 |
| 3.7.1. | Manual guía de utilización del tomógrafo para evaluación de núcleos de capa asfáltica | 84 |
| 3.7.1.1. | Introducción | 84 |
| 3.7.1.2. | Especificaciones del tomógrafo utilizado | 85 |
| 3.7.1.3. | Tipo de muestra para tomografía computarizada de rayos-x | 86 |
| 3.7.1.4. | Colocación de la muestra en el tomógrafo..... | 86 |
| 3.7.1.5. | Intensidad del haz de rayos-x y el tiempo de exposición..... | 87 |
| 3.7.1.6. | Resolución de las imágenes obtenidas por tomografía | 88 |
| 3.8. | ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DIGITALIZADAS OBTENIDAS POR TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS-X..... | 90 |
| 3.8.1. | Análisis de porcentaje de vacíos | 90 |
| 3.8.1.1. | Porcentaje de vacíos de núcleos con ahuellamiento | 92 |
| 3.8.1.2. | Porcentaje de vacíos de núcleos sin ahuellamiento..... | 95 |
| 3.8.2. | Análisis de contacto agregado-agregado..... | 97 |
| 3.8.2.1. | Contacto agregado-agregado de núcleos con ahuellamiento | 99 |
| 3.8.2.2. | Contacto agregado-agregado de núcleos sin ahuellamiento | 102 |
| 3.9. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 105 |
| 3.9.1. | Análisis de núcleos extraídos | 105 |

| | |
|---|-----|
| 3.9.1.1. Porcentaje de vacíos de núcleos con ahuellamiento | 105 |
| 3.9.1.2. Porcentaje de vacíos de núcleos sin ahuellamiento..... | 108 |
| 3.9.1.3. Contacto agregado-agregado de núcleos con ahuellamiento | 111 |
| 3.9.1.4. Contacto agregado-agregado de núcleos sin ahuellamiento | 114 |
| 3.9.2. Relación entre variables | 117 |
| 3.9.2.1. Contacto agregado - Porcentaje de vacíos de núcleos con ahuellamiento | 117 |
| 3.9.2.2. Contacto agregado - Porcentaje de vacíos de núcleos sin ahuellamiento..... | 122 |

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | Página |
|----------------------------|--------|
| 4.1. CONCLUSIONES | 127 |
| 4.2. RECOMENDACIONES | 131 |

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO 1. IMÁGENES TOMOGRÁFICAS DE NÚCLEOS CON AHUELLAMIENTO

ANEXO 2. IMÁGENES TOMOGRÁFICAS DE NÚCLEOS SIN AHUELLAMIENTO

ANEXO 3. DOCUMENTOS DE RESPALDO

ANEXO 4. REGISTRO FOTOGRÁFICO

ANEXO 5. ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO

ANEXO 6. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| Figura 1.1: Localización satelital av. Panamericana (Puente de San Jorge II - Ingreso a la nueva terminal de buses) | 8 |
| Figura 1.2: Localización satelital av. Panamericana (Hotel Los Ceibos - Pasarela del colegio Fe y Alegría)..... | 9 |
| Figura 1.3: Localización satelital av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino) | 10 |
| Figura 1.4: Imagen en composición binaria..... | 14 |
| Figura 1.5: Imagen sin pigmentación..... | 15 |
| Figura 1.6: Imagen con pigmentación roja | 15 |
| Figura 1.7: Identificación de puntos de contacto | 16 |
| Figura 2.1: Pavimento flexible..... | 25 |
| Figura 2.2: Pavimento articulado | 26 |
| Figura 2.3: Pavimento rígido..... | 26 |
| Figura 2.4: Sección transversal de un pavimento flexible | 27 |
| Figura 2.5: Distribución de cargas en el pavimento flexible | 28 |
| Figura 2.6: Capa de rodadura | 31 |
| Figura 2.7: Base asfáltica | 32 |
| Figura 2.8: Preparación de la subrasante..... | 33 |
| Figura 2.9: Fenómeno de ahuellamiento..... | 39 |
| Figura 2.10: Deformaciones permanentes (ahuellamiento) | 41 |
| Figura 2.11: Modelo reológico del comportamiento de materiales viscoelásticos | 41 |
| Figura 2.12: Granulometría para tráfico pesado y moderado | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.13: Variación de densidad y contenido de vacíos en la mezcla asfáltica | 45 |
| Figura 2.14: Perfilómetro láser | 46 |
| Figura 2.15: Perfilómetro óptico K. J. Law DNC 690 | 48 |
| Figura 2.16: Tranverse profile logger (TPL)..... | 49 |
| Figura 2.17: Esquema gráfico para medición del ahuellamiento | 51 |
| Figura 2.18: Medición de la profundidad de huella | 51 |
| Figura 2.19: Perfilógrafo transversal..... | 52 |
| Figura 2.20: Registro de un perfilógrafo transversal | 52 |
| Figura 2.21: Perfilómetro portátil | 53 |
| Figura 2.22: Sistema de rayos-x..... | 55 |
| Figura 2.23: Imágenes tomográficas | 56 |
| Figura 2.24: Tomógrafo Toshiba Aquilion 16 | 57 |
| Figura 3.1: Localización satelital av. Panamericana (Puente de San Jorge II – Nueva terminal de buses) | 60 |
| Figura 3.2: Localización satelital av. Panamericana (Hotel Los Ceibos - Pasarela colegio Fe y Alegría)..... | 61 |
| Figura 3.3: Localización satelital av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino) | 62 |
| Figura 3.4: Extracción de núcleos asfálticos | 63 |
| Figura 3.5: Relleno de punto de extracción | 64 |
| Figura 3.6: Núcleos extraídos | 64 |
| Figura 3.7: Medición de ahuellamiento | 65 |
| Figura 3.8: Pesaje de núcleos | 67 |
| Figura 3.9: Medición de núcleos..... | 67 |
| Figura 3.10: Pesaje de muestra de ensayo..... | 70 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.11: Muestra en el extractor centrífugo..... | 71 |
| Figura 3.12: Ensayo de extracción de asfalto..... | 71 |
| Figura 3.13: Granulometría de áridos de extracción..... | 74 |
| Figura 3.14: Tomógrafo Toshiba Aquilion 16..... | 85 |
| Figura 3.15: Colocado de muestra en el tomógrafo..... | 86 |
| Figura 3.16: Consola de control..... | 87 |
| Figura 3.17: Estructura interna de núcleo asfáltico en eFilm Lite..... | 89 |
| Figura 3.18: Valor de pixel en ImageJ..... | 90 |
| Figura 3.19: Ajustes de imagen en ImageJ..... | 91 |
| Figura 3.20: Visualización de vacíos..... | 91 |
| Figura 3.21: Obtención del porcentaje de vacíos..... | 92 |
| Figura 3.22: Porcentaje de vacíos..... | 92 |
| Figura 3.23: Aplicación de valor límite de pixel..... | 98 |
| Figura 3.24: Aplicación de filtro rojo..... | 98 |
| Figura 3.25: Puntos de contacto..... | 99 |
| Figura 3.26: Conteo de puntos de contacto..... | 99 |
| Figura 3.27: Puntos de contacto..... | 100 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Página |
|---|--------|
| Tabla 3.1: Distribución de puntos de muestreo..... | 59 |
| Tabla 3.2: Coordenadas geográficas tramo N°1 | 60 |
| Tabla 3.3: Coordenadas geográficas tramo N°2..... | 61 |
| Tabla 3.4: Coordenadas geográficas tramo N°3..... | 62 |
| Tabla 3.5: Ahuellamientos - Tramo N°1 | 65 |
| Tabla 3.6: Ahuellamientos - Tramo N°2..... | 66 |
| Tabla 3.7: Ahuellamientos - Tramo N°3..... | 66 |
| Tabla 3.8: Peso volumétrico de núcleos tramo N°1 - Ahuellado | 68 |
| Tabla 3.9: Peso volumétrico de núcleos tramo N°2 - Ahuellado | 68 |
| Tabla 3.10: Peso volumétrico de núcleos tramo N°3 - Ahuellado | 69 |
| Tabla 3.11: Peso volumétrico de núcleos tramo N°1 – No ahuellado..... | 69 |
| Tabla 3.12: Peso volumétrico de núcleos tramo N°2 – No ahuellado..... | 69 |
| Tabla 3.13: Peso volumétrico de núcleos tramo N°3 – No ahuellado..... | 70 |
| Tabla 3.14: % Ligante asfáltico tramo N°1 - Ahuellado..... | 72 |
| Tabla 3.15: % Ligante asfáltico tramo N°2 - Ahuellado..... | 72 |
| Tabla 3.16: % Ligante asfáltico tramo N°3 - Ahuellado..... | 73 |
| Tabla 3.17: % Ligante asfáltico tramo N°1 – No ahuellado | 73 |
| Tabla 3.18: % Ligante asfáltico tramo N°2 – No ahuellado | 73 |
| Tabla 3.19: % Ligante asfáltico tramo N°3 – No ahuellado | 74 |
| Tabla 3.20: Granulometría tramo N°1 - Ahuellado..... | 75 |
| Tabla 3.21: Granulometría tramo N°2 - Ahuellado..... | 76 |
| Tabla 3.22: Granulometría tramo N°3 - Ahuellado..... | 77 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.23: Granulometría tramo N°1 – No ahuellado | 78 |
| Tabla 3.24: Granulometría tramo N°2 - No ahuellado | 79 |
| Tabla 3.25: Granulometría tramo N°3 - No ahuellado | 80 |
| Tabla 3.26: Granulometría tramo N°1 (ahuellado vs. no ahuellado) | 81 |
| Tabla 3.27: Granulometría tramo N°2 (ahuellado vs. no ahuellado) | 82 |
| Tabla 3.28: Granulometría tramo N°3 (ahuellado vs. no ahuellado) | 83 |
| Tabla 3.29: Porcentaje de vacíos tramo N°1 - Ahuellado | 93 |
| Tabla 3.30: Porcentaje de vacíos tramo N°2 - Ahuellado | 94 |
| Tabla 3.31: Porcentaje de vacíos tramo N°3 - Ahuellado | 95 |
| Tabla 3.32: Porcentaje de vacíos tramo N°1 – No ahuellado..... | 95 |
| Tabla 3.33: Porcentaje de vacíos tramo N°2 - No ahuellado | 96 |
| Tabla 3.34: Porcentaje de vacíos tramo N°3 - No ahuellado | 97 |
| Tabla 3.35: Contacto agregado-agregado tramo N°1 – Ahuellado | 100 |
| Tabla 3.36: Contacto agregado-agregado tramo N°2 - Ahuellado | 101 |
| Tabla 3.37: Contacto agregado-agregado tramo N°3 - Ahuellado | 102 |
| Tabla 3.38: Contacto agregado-agregado tramo N°1 - No ahuellado | 103 |
| Tabla 3.39: Contacto agregado-agregado tramo N°2 - No ahuellado | 103 |
| Tabla 3.40: Contacto agregado-agregado tramo N°3 - No ahuellado | 104 |
| Tabla 3.41: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°1 - Ahuellado | 118 |
| Tabla 3.42: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°2 - Ahuellado | 119 |
| Tabla 3.43: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°3 - Ahuellado | 121 |
| Tabla 3.44: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°1 – No ahuellado..... | 122 |
| Tabla 3.45: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°2 – No ahuellado..... | 124 |
| Tabla 3.46: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°3 – No ahuellado..... | 125 |

ÍNDICE DE GRÁFICAS

| | Página |
|---|--------|
| Gráfica 3.1: Curva granulométrica tramo N°1 - Ahuellado | 75 |
| Gráfica 3.2: Curva granulométrica tramo N°2 - Ahuellado | 76 |
| Gráfica 3.3: Curva granulométrica tramo N°3 - Ahuellado | 77 |
| Gráfica 3.4: Curva granulométrica tramo N°1 - No ahuellado | 78 |
| Gráfica 3.5: Curva granulométrica tramo N°2 - No ahuellado | 79 |
| Gráfica 3.6: Curva granulométrica tramo N°3 - No ahuellado | 80 |
| Gráfica 3.7: Curva granulométrica tramo N°1 (ahuellado vs. no ahuellado)..... | 81 |
| Gráfica 3.8: Curva granulométrica tramo N°2 (ahuellado vs. no ahuellado)..... | 82 |
| Gráfica 3.9: Curva granulométrica tramo N°3 (ahuellado vs. no ahuellado)..... | 83 |
| Gráfica 3.10: Porcentaje de vacíos tramo N°1 - Ahuellado | 105 |
| Gráfica 3.11: Porcentaje de Vacíos Tramo N°2 - Ahuellado | 106 |
| Gráfica 3.12: Porcentaje de vacíos tramo N°3 - Ahuellado | 107 |
| Gráfica 3.13: Porcentaje de vacíos tramo N°1 - No ahuellado..... | 108 |
| Gráfica 3.14: Porcentaje de vacíos tramo N°2 - No ahuellado..... | 109 |
| Gráfica 3.15: Porcentaje de vacíos tramo N°3 - No ahuellado..... | 110 |
| Gráfica 3.16: Contacto agregado-agregado tramo N°1 - Ahuellado | 111 |
| Gráfica 3.17: Contacto agregado-agregado tramo N°2 - Ahuellado | 112 |
| Gráfica 3.18: Contacto agregado-agregado tramo N°3 - Ahuellado | 113 |
| Gráfica 3.19: Contacto agregado-agregado tramo N°1 - No ahuellado | 114 |
| Gráfica 3.20: Contacto agregado-agregado tramo N°2 - No ahuellado | 115 |
| Gráfica 3.21: Contacto agregado-agregado tramo N°3 - No ahuellado | 116 |

| | |
|--|-----|
| Gráfica 3.22: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°1 - Ahuellado | 118 |
| Gráfica 3.23: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°2 - Ahuellado | 120 |
| Gráfica 3.24: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°3 - Ahuellado | 121 |
| Gráfica 3.25: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°1 – No ahuellado..... | 123 |
| Gráfica 3.26: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°2 – No ahuellado..... | 124 |
| Gráfica 3.27: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°3 – No ahuellado..... | 125 |
| Gráfica 4.1: Contacto agregado – % Vacíos (núcleos ahuellados) | 127 |
| Gráfica 4.2: % Asfalto y espesor de pavimento (núcleos ahuellados)..... | 128 |
| Gráfica 4.3: % Vacíos – Ahuellamientos (núcleos ahuellados)..... | 128 |
| Gráfica 4.4: Contacto agregado – % Vacíos (núcleos no ahuellados) | 129 |
| Gráfica 4.5: % Asfalto y espesor de pavimento (núcleos no ahuellados)..... | 130 |