

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Actualmente, los pavimentos flexibles son fundamentales para las ciudades y poblaciones, ya que facilitan la interconexión con el resto del país. Estos requieren mantenimiento preventivo para asegurar su funcionalidad y durabilidad. Los caminos carreteros son diseñados con una vida útil estimada, diversos factores como la sobrecarga de vehículos, la falta de mantenimiento, el desgaste por el clima y fallas en el sistema de drenaje pueden reducir el tiempo de vida.

El tramo vial Copacabana – Yunchará es un medio importante para el desarrollo y crecimiento del municipio de Yunchará, ya que facilita la comunicación entre comunidades y departamentos, así como el transporte de productos desde la zona alta hacia las ciudades de Tarija y Villazón. No obstante, desde su inauguración en 2016, no se ha llevado a cabo ninguna evaluación superficial ni estructural del pavimento. Con el tiempo, la demanda de estas vías ha aumentado, lo que hace necesario mantenerlas en condiciones óptimas para garantizar una circulación segura y eficiente.

El tramo asfaltado vial Copacabana - Yunchará forma parte de la Ruta D-611 de la Red Departamental de Carreteras de Tarija y está previsto integrarse al Corredor Bioceánico Central Sud. Además, conecta Tarija con importantes poblaciones fronterizas como Villazón y Tupiza, está catalogado como carretera de vinculación turística, lo que resalta la importancia de su mantenimiento adecuado.

La vía se ubica en el extremo este de la cordillera oriental, específicamente en la serranía de Yunchará. El drenaje de la zona se divide en dos sistemas: uno que fluye hacia el sud este y drena en las lagunas de Tajzara, Grande y Chica (sistema endorreico), y otro que pertenece a la cuenca del río San Juan del Oro.

El clima de la zona es andino o altiplánico, con altitudes entre 3000 y 4500 msnm. Se caracteriza por un clima semiárido con temperaturas medias anuales de 11,3 °C, máximas de hasta 35 °C en los meses calurosos y mínimas de 5,5 °C en los meses de invierno. Las heladas son comunes, especialmente con mínimas extremas de hasta -10 °C en abril. Estas

condiciones climáticas impactan en la durabilidad del pavimento, justificando la necesidad de evaluaciones periódicas.

En relación con las temperaturas locales y el aumento del tráfico vehicular en el tramo vial, se han observado fallas y reparaciones a lo largo del trayecto. Estas condiciones justifican la necesidad de llevar a cabo una evaluación detallada tanto superficial como estructural del pavimento flexible. El objetivo es identificar y abordar las fallas existentes para prevenir su expansión, implementar un mantenimiento adecuado y evitar costos adicionales en el futuro. Esta intervención no solo extenderá la vida útil del pavimento, sino que también mejorará la comodidad para los vehículos y usuarios que transitan por la vía.

1.2. Situación problemática

La vida útil de un pavimento flexible se ve afectado por diversos factores que, con el tiempo, pueden generar fallas y anomalías que deterioran la condición de la vía. Estos problemas no solo reducen la calidad de la infraestructura, sino que también incrementan el riesgo de accidentes de tránsito y fallas mecánicas en los vehículos, además de provocar retrasos en el flujo habitual de los usuarios.

El tramo Copacabana - Yunchará es transitado por todo tipo de vehículos, facilitando el transporte de personas y mercancías esenciales para el abastecimiento de insumos clave en el crecimiento de las poblaciones rurales, urbanas y del municipio de Yunchará. Aunque el trayecto presenta fallas y reparaciones menores, estas pueden empeorar con el tiempo. Por ello, la evaluación del pavimento es de vital importancia, donde se obtendrán datos precisos sobre el comportamiento del pavimento bajo las cargas del tráfico vehicular y la influencia de factores ambientales, como la temperatura y la humedad. Esto permitirá determinar con exactitud la condición actual del tramo en estudio y tomar medidas oportunas para su mantenimiento y prolongación de su vida útil, evitando así costos mayores en el futuro.

1.2.1. Problema

¿cómo se puede determinar las condiciones de la superficie y la estructura del pavimento flexible del tramo Copacabana - Yunchará?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

El mantenimiento adecuado de las carreteras prolonga su vida útil, reduce el riesgo de daños, y mejora la seguridad vial al prevenir accidentes. Evaluar el pavimento de manera superficial y estructural permite una planificación eficiente de intervenciones, mejorando la eficiencia en el uso de recursos económicos. Mantener este tramo en buenas condiciones es importante para la movilidad, el comercio y el desarrollo económico y social del municipio de Yunchará. La inspección visual, el uso de métodos y la información técnica proporcionada por el Sedeca permiten evaluar el pavimento flexible y determinar su estado del tramo vial con precisión. Los resultados facilitan a las autoridades la toma de decisiones informadas sobre mantenimiento y rehabilitación, garantizando la viabilidad del proyecto.

1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema

Se encuentra en tiempo presente ya que es evaluar en la actualidad el estado del pavimento flexible.

El tramo Copacabana – Yunchará es parte de la Ruta D-611 de la Red Departamental de Carreteras de Tarija. Esta ruta conecta Tarija con importantes poblaciones fronterizas como Villazón y Tupiza. Se encuentra dentro del municipio de Yunchará, en la provincia Avilés, del departamento de Tarija.

1.3. Justificación

Identificar las posibles causas que dieron origen a las fallas en la estructura del pavimento flexible del tramo Copacabana - Yunchará, mediante un estudio detallado de evaluación superficial y estructural. En la construcción de carreteras es fundamental llevar a cabo un estudio detallado del proyecto y garantizar un riguroso control de calidad tanto antes como después de la ejecución. Esto asegura que la obra cumpla adecuadamente su función y tenga una vida útil prolongada

Actualmente, el tramo Copacabana - Yunchará circula tanto tránsito pesado como liviano, lo que ha llevado a la necesidad de diagnosticar el estado de esta vía. Este tramo es de alta demanda, utilizado por usuarios que se desplazan de Tarija a Villazón o Tupiza, así como hacia la República Argentina y viceversa. Además, es frecuentado por campesinos de la

zona alta que transportan sus productos a las ciudades cercanas. El tramo vial es parte de la ruta que une el altiplano Tarijeño con el valle central de Tarija, es fundamental realizar evaluaciones rutinarias del estado de la carretera para asegurar un viaje más seguro y cómodo para los usuarios.

El mantenimiento adecuado de las carreteras es esencial para el desarrollo socioeconómico de las comunidades. Un pavimento en mal estado puede aumentar los riesgos de accidentes de tránsito, causar molestias a los conductores y tener un impacto negativo en la economía local debido a los costos de reparación de vehículos y los tiempos de viaje prolongados. Mejorar la calidad y durabilidad del pavimento contribuye al bienestar de la comunidad, facilitando el acceso a servicios y fomentando el desarrollo del municipio de Yunchará.

El estudio permitirá evaluar el grado de deterioro de la vía y determinar las causas subyacentes para adoptar medidas de reparación y mantenimiento económicamente viables. Esta información será útil para el gobierno departamental de Tarija, permitiendo a las autoridades pertinentes intervenir de manera efectiva y resolver los problemas existentes.

1.4. Objetivo

1.4.1. Objetivo general

Evaluar superficial y estructuralmente las condiciones del pavimento flexible en el tramo Copacabana – Yunchará mediante los métodos PCI, IRI, IFI y viga BENKELMAN, para determinar su estado actual.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar los tipos de falla en el tramo de estudio.
- Clasificar los niveles de severidad de las fallas superficiales del tramo de estudio.
- Obtener datos de deflexiones generadas en la estructura del pavimento flexible.
- Determinar la microtextura y macrotextura del pavimento flexible.
- Analizar los resultados de estado superficial y estructural del tramo en estudio.

1.5. Hipótesis

Si, al realizar la evaluación superficial y estructural del tramo "Copacabana - Yunchará", se determinara el estado del pavimento flexible.

1.6. Operacionalización de las variables

Variable se refiere “Condición superficial y estructural del pavimento flexible”

1.6.3. Variable independiente

Tabla 1. Conceptualización y operación de la variable independiente

VARIABLE	DIMENSION	INDICADOR	VALOR/ACCIÓN
Condición superficial y estructural del pavimento flexible	(Fallas)	Longitud (m) Superficie (m ²)	Se identifica los tipos de falla, medición de superficies, longitudes, severidad y valoración de ellas mediante metodología PCI.
	(Regularidad)	Índice de regularidad	Valor del movimiento vertical acumulado mediante un perfil longitudinal a lo largo de una distancia dada, obtenido con el rugosímetro de Merlín.
	(fricción y Profundidad de textura)	C.R.D (coeficiente de resistencia al deslizamiento)	Usando el péndulo británico
		Profundidad (mm)	Cálculo de profundidad mediante el volumen y superficie abarcados por la mancha de arena.
	(Deflexión y temperatura)	Milímetros (mm)	Usando la viga Benkelman.
		Grados centígrados (°C)	Midiendo con termómetros especiales para pavimentos.

Fuente: Elaboración Propia

1.7. Identificación del tipo de investigación

El tipo de investigación que se desarrolla a lo largo de este trabajo corresponde a una investigación descriptiva, ya que se observa los fenómenos que se dan de manera natural en el objeto de estudio a fin de evaluar y determinar las fallas que presenta la vía tanto en la superficie como en la estructura.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

1.8.1. Unidad de estudio

Determinación del estado actual del pavimento flexible del tramo vial Copacabana – Yunchará.

1.8.2. Población

Ruta D-611 de la red departamental que une los departamentos de Tarija y Potosí.

1.8.3. Muestra

La muestra seleccionada de la población es el tramo vial Copacabana – Yunchará

1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo

Para la obtención de datos de fallas existentes en el sitio de estudio, se realizó una división de la superficie del tramo en unidades homogéneas. De esta división se podrá considerar los tipos de fallas existentes siendo la aplicación del método elegido para el estudio del mismo.

1.9. Métodos y técnicas empleadas

1.9.1. Métodos

Empíricos (inspección visual del pavimento flexible, ensayos en campo, verificación de velocidades) e teóricos (revisión bibliográfica, Normas ASTM, manual de evaluación y mantenimiento de pavimentos, análisis del estado y mantenimiento adecuado para el tramo vial).

1.9.2. Técnicas

Las técnicas se describen al momento de realizar los ensayos para los diferentes métodos:

➤ **PCI (Índice de Condición del Pavimento)**

- Cinta métrica
- Pintura látex
- Manual de evaluación
- Planilla de datos
- Regla graduada

➤ **IRI (Índice de Regularidad Internacional)**

- Rugosímetro de Merlín

➤ **IFI (Índice de Fricción Internacional)**

- Equipo Circulo de arena
- Péndulo británico

➤ **Viga Benkelman**

- Volqueta 8,2 toneladas de carga
- Deflectómetro Bekelman

1.10. Procesamiento de la información

Se realizó un análisis específico de los resultados de cada método aplicado, para conocer el estado del pavimento flexible del tramo vial Copacabana - Yunchará.

1.11. Determinación del alcance de la investigación

Se realizará la evaluación superficial y estructural del pavimento flexible en “el tramo Copacabana – Yunchará” para determinar la condición actual en la que se encuentra el tramo, Para la evaluación superficial, se empleará el método PCI para determinar el índice de condición del pavimento. Posteriormente, se aplicará el método IFI para determinar los índices de fricción y textura, y el método IRI para determinar la regularidad superficial del pavimento. En cuanto a la evaluación estructural, se utilizará la viga Benkelman, para medir el rebote de la deflexión estática del pavimento asfáltico bajo la aplicación de una carga, concluyendo con los análisis de los resultados del estudio en el tramo vial.

CAPÍTULO II

EVALUACIÓN SUPERFICIAL Y ESTRUCTURAL DEL

PAVIMENTO FLEXIBLE

CAPÍTULO II

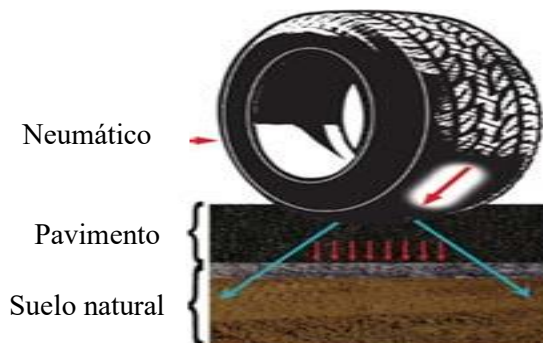
EVALUACIÓN SUPERFICIAL Y ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

2.1. Definición de pavimentos

La infraestructura carretera, resulta de modificar el terreno natural, construyendo las obras necesarias para procurar una superficie adecuada al pavimento. Comprende por lo tanto el movimiento de tierras, cortes y terraplenes y las obras de drenaje, necesarias para dar continuidad a los escurrimientos naturales y las que requieren para asegurar la estabilidad general de la obra básica.

De acuerdo a la concepción actual de pavimentos, estos se pueden definir como un sistema que funciona obedeciendo determinadas leyes de física reaccionando en forma de respuesta cuando es activado por funciones de excitación. Las leyes físicas consideradas, determinaran la forma en que interactúan los esfuerzos, las deformaciones unitarias, el tiempo y la temperatura. Es decir, el pavimento, es un sistema que esta caracterizado por las propiedades, espesores y acomodo a los distintos materiales que conforman un conjunto de capas colocadas y apoyadas sobre otra, denominada “subrasante “, con el propósito de recibir en forma directa las cargas del tránsito y transmitirla a los estratos inferiores en forma disipada y distribuyéndolas con uniformidad como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Funciones de los pavimentos



Fuente: Tapia García, M. A. (2016). Pavimentos. “México”: Universidad Nacional de México Facultad de Ingeniería DECDFI.

2.2. Tipos de los pavimentos

Actualmente se cuentan con una gran variedad de pavimentos que, atendiendo los criterios tradicionales, básicamente pueden clasificarse en: rígidos y flexibles, mixtos o compuestos. A continuación, veremos en que consiste cada uno de ellos.

2.2.1. Pavimento Flexible

Estos pavimentos cuentan con una capa de rodadura constituidas por mezcla asfáltica, por lo que también se los conoce como pavimentos asfálticos. Resultan más económicos en su construcción inicial, pero tiene la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil.

El incremento, tanto en intensidad como en número de las obligaciones de cargas, llevo en su momento a la realización de pavimentos con mayor capacidad estructural, recurriendo a capas tratadas o estabilidades con cemento o con un espesor considerable de mezclas asfálticas, como la denominadas “full depth”, con espesores del orden de 30 cm. Estos pavimentos suelen incluirse también en el tipo de los pavimentos flexibles, debido a que tienen superficialmente capas asfálticas, pero su comportamiento estructural es muy diferente, con capas inferiores de igual o mayor rigidez que las superiores (Tapia Garcia, 2016).

Gráfico 1. Pavimento flexible



Fuente: Elaboración Propia

2.2.2. Pavimentos rígidos

En los pavimentos rígidos, la superficie de rodaje es proporcionada por losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presentan un armado de acero. Por su mayor rigidez distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las losas adyacentes que trabajan en conjunto con la que recibe directamente la carga. A excepción de los bordes de las losas y las juntas, sin junta, las deflexiones y deformaciones elásticas son casi nulas. Este tipo de pavimentos no puede plegarse las deformaciones de las capas inferiores sin que se presente la falla estructural. Generalmente, el mantenimiento que requiere es mínimo y comúnmente solo se efectúa en las juntas de las losas.

Gráfico 2. Pavimento rígido



Fuente: Tapia García, M. A. (2016). “Pavimentos”. México: Universidad Nacional de México Facultad de Ingeniería DECDI.

2.2.3. Pavimentos mixtos o compuestos

Los pavimentos mixtos o compuestos, están conformados por una capa de concreto hidráulico, cubierta por una carpeta asfáltica, se emplean en calles y su justificación se basa, en la presencia de redes y servicios bajo la vialidad, que deben protegerse de la acción del tránsito. Su posición impide efectuar excavaciones a mayor profundidad para alojar una estructura del pavimento flexible convencional. Así mismo, pueden tener una mayor capacidad estructural y por consiguiente un mejor desempeño.

Gráfico 3. Pavimento compuesto



Fuente: Tapia García, M. A. (2016). Pavimentos. México: Universidad Nacional de México Facultad de Ingeniería DECDFI.

2.1.1. Componentes de un pavimento flexible

Los pavimentos flexibles están constituidos por las siguientes capas: carpeta asfáltica, base, subbase y subrasante.

Figura 2. Componentes de un pavimento flexible



Fuente: Elaboración Propia

2.1.1.1. Capa asfáltica

Es la parte superior de un pavimento, que puede ser tipo bituminosos (flexible) o de concreto de cemento portland (rígido) o de adoquines, cuya función es sostener directamente el tránsito (Manual de Carreteras Perú, 2014).

2.1.1.2. Base

Es la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función de sostener, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa era de material granular (CBR > 80%) o será tratada con asfalto, cal o cemento (Manual de Carreteras Perú, 2014).

2.1.1.3. Subbase

Es la capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la carpeta. además, se utiliza como capa de drenaje y controlador de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta capa puede obviarse. Esta capa puede ser material granular (CBR > 40%) o tratada con asfalto, cal o cemento (Manual de Carreteras Perú, 2014).

2.1.1.4. Subrasante

Es la capa más profunda de toda la estructura que conforma el pavimento. Estos suelos pertenecientes a la subrasante ser adecuados y estables con un CBR igual o mayor a 6%. En el caso que sea menor (subrasante pobre o inadecuada), corresponde estabilizar los suelos, para lo cual se tendrá que analizar alternativas de solución, como la estabilización mecánica, el reemplazo de suelo, estabilización química de suelo, estabilización con geosintéticos, entre otros, eligiendo la alternativa más conveniente en cuanto a lo técnico y económico. Se apoya sobre el terreno natural de fundación. (Manual de Carreteras Perú, 2014).

2.2. Fallas en los pavimentos

2.2.1. Causas del surgimiento de las fallas

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

1. fin del periodo de diseño original ausencia de acciones de rehabilitación mayor durante el mismo. En este caso la falla es la prevista o esperada.
2. Incremento del tránsito con respecto a las estimaciones de diseño del pavimento original.
3. Deficiencias en el proceso constructivo, bien en procesos como tal como en la calidad de los materiales empleados.
4. Diseño deficiente (errores en la estimación del tránsito o en la valoración de las propiedades de los materiales empleados).
5. Factores climáticos imprevistos (lluvias extraordinarias).
6. Insuficiencia de estructura de drenaje superficial y/o subterráneo.
7. Insuficiencia o ausencia de mantenimiento y/o rehabilitación de pavimento.

Dependiendo de su origen, las fallas pueden ser clasificadas como fallas funcionales (superficiales) o fallas estructurales. En el primer caso, el defecto se presenta o circunscribe a la superficie de la capa asfáltica y las acciones de reparaciones se dirigen a la corrección de la fricción(seguridad), o al restablecimiento de la rugosidad o regularidad (comodidad), lo cual se logra con la elaboración de capas asfálticas de bajo espesor que no contribuyen desde el punto de vista estructural. Por su parte las fallas estructurales tienen su origen en defecto 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 sub rasante o suelo de fundación de pavimento lleguen a los menores esfuerzos y lo más distribuido posible (Corros B., Urbaz P., & Corredor M., 2009).

2.3. Importancia de la evaluación de pavimentos

La evaluación de pavimentos consiste en un informe, en el cual se presenta el estado en el que halla la superficie del mismo, para de esta manera poder adoptar las medidas adecuadas de reparación y mantenimiento, con las cuales se pretende prolongar la vida útil de los pavimentos, es así, que es de suma importancia elegir y realizar la evaluación que sea objetiva y acorde al medio en que se encuentre (Leguia L. & Pacheco R., 2016).

Existen dos tipos de evaluación de pavimentos

- Evaluación superficial

- Evaluación estructural

2.3.1. Evaluación Superficial de un Pavimento Flexible

La evaluación superficial debe ser definida de una manera periódica, con el fin de determinar la naturaleza y extensión de los deterioros en el pavimento ya que tales datos son extremadamente importantes debido al impacto directo que tienen sobre el comportamiento del pavimento existente y sobre aquellas capas de refuerzos posteriores. Este tipo de evaluación es también importante porque permite determinar el tratamiento más adecuado que requiere la superficie del pavimento antes de colocar la sobrecarga de refuerzo (Leguia L. & Pacheco R., 2016).

2.3.1.1. Método PCI (Índice de Condición de Pavimento)

El índice de condición del pavimento PCI se constituye en la metodología más completa para la evaluación y calificación objetiva de pavimentos, flexibles y rígidos dentro de los modelos de gestión vial disponibles en la comunidad. La metodología es fácil de implementación y no requiere de herramientas especializadas más allá de las que constituyen el sistema y a las cuales se presenta a continuación (Vasquez, 2002).

El PCI es un índice numérico que varía desde cero (0), para un pavimento fallado o en mal estado, hasta cien (100) para un pavimento en perfecto estado. En tabla 2 se presenta los rangos PCI con la correspondiente descripción cuantitativa de la condición del pavimento.

Tabla 2. Escala de clasificación del PCI

Rango	Clasificación
100-85	excelente
85-70	muy bueno
70-55	bueno
55-40	regular
40-25	malo
25- 10	muy malo
10-0	fallado

Fuente: Vásquez, L. R. (2002). "Pavement Condition Index (PCI)

El método PCI es un procedimiento que consiste en la determinación de la condición del pavimento a través de inspecciones visuales, identificando la clase, severidad y cantidad

de fallas encontradas, siguiendo una metodología de fácil implementación y que no requiere de herramientas especializadas, pues se mide la condición del pavimento de manera directa.

La siguiente tabla se muestra las (19) fallas consideradas por el método.

Tabla 3. Pavimentos flexibles método PCI - fallas consideradas

FALLA N.º	TIPO - NOMBRE	UNIDAD
1	Grieta piel de cocodrilo	m ²
2	Exudación de asfalto	m ²
3	Grietas de contracción (bloque)	m ²
4	Elevación – Hundimiento	m
5	Corrugaciones	m ²
6	Depresiones	m ²
7	Grietas de borde	m
8	Grietas de deflexión de juntas	m
9	Desnivel calzado – hombrillo	m
10	Grietas longitudinales y transversales	m
11	Baches y zanjas reparadas	m ²
12	Agregados pulidos	m ²
13	Huecos	m ²
14	Cruce de rieles	m ²
15	Ahuellamiento	m ²
16	Deformación por empuje	m ²
17	Grietas deslizamiento	m ²
18	Hinchamiento	m ²
19	Disgregación y desintegración	m ²

Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Procedimiento de evaluación de la condición del pavimento para el PCI

La primera etapa corresponde al trabajo de campo en el cual se identifican los daños teniendo en cuenta la clase, severidad y extensión de los mismos. Esta información se registra en formatos adecuados para tal fin.

La severidad, representa la criticidad del deterioro en términos de su progresión; entre más severo sea el daño, mas importantes deberán ser las medidas para su corrección. De esta manera, se deberá valorar la calidad del viaje, la percepción que tiene el usuario al transitar en un vehículo a velocidad normas; es así que se describe una guía general de ayuda para establecer el grado de severidad de la calidad de tránsito.

Bajo (L): se perciben vibraciones en el vehículo (por ejemplo, por corrugaciones), pero no es necesaria la reducción de la velocidad en aras de la comodidad o la seguridad. Las elevaciones y hundimientos individuales causan un ligero rebote del vehículo, pero no provoca incomodidad.

Medio (M): las vibraciones del vehículo son significativas y se requiere una reducción de la velocidad en aras de la comodidad y la seguridad; las elevaciones o hundimientos individuales causan un rebote significativo creando incomodidad.

Alto (H): las vibraciones en el vehículo son tan excesivas que debe reducirse la velocidad de forma considerable en aras de la comodidad y la seguridad; las elevaciones o hundimientos individuales causan un excesivo rebote del vehículo creando una incomodidad importante o un alto potencial de peligro o daño severo al vehículo.

Unidades de muestreo PCI

Se divide la vía en secciones o “unidades de muestreo”, cuyas dimensiones varían de acuerdo con los tipos de vía y de capa de rodadura:

Carreteras con capa de rodadura asfáltica y ancho menor que 7,30 m. el área de la unidad de muestreo debe estar en el rango 230.0 ± 93.0 m². En la tabla 4. se presentan algunas relaciones longitud - ancho de calzada pavimentada.

Tabla 4. Longitudes de unidades de muestreo

Ancho de calzada (m)	Longitud de la unidad de muestra (m)
5.0	46.0
5.5	41.8
6.0	38.3
6.5	35.4
7.3 (Máximo)	31.5

Fuente: Norma ASTM D 6433-03 “Manual del PCI”

Se recomienda tomar el valor medio de los rangos y en ningún caso definir unidades por fuera de aquellos. Para cada pavimento inspeccionado se sugiere la elaboración de esquemas que muestren el tamaño y la localización de las unidades ya que servirá para referencia futura.

Determinación de las unidades de muestreo para evaluación

En la evaluación de una red vial, puede tenerse un número muy grande de unidades de muestreo cuya inspección demandará tiempo y recursos considerables; por lo tanto, es necesario aplicar un proceso de muestreo.

En la evaluación de un proyecto se deben inspeccionar todas las unidades; sin embargo, de no ser posible, el número mínimo de unidades de muestreo que deben evaluarse se obtiene mediante la ecuación del número mínimo de unidades de muestra “n”, la cual produce un estimado del $PCI \pm 5$ del promedio verdadero con una confiabilidad del 95%.

$$n = \frac{N * \sigma^2}{\left(\frac{e^2}{4}\right) * (N - 1) + \sigma^2}$$

Donde:

n= Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar.

N= Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento

e= Error admisible en el estimativo del PCI de la sección (e =5)

σ = Desviación estándar del PCI entre las unidades.

Durante la inspección inicial se asume una desviación estándar (σ) del PCI de 10 para pavimento asfáltico (rango PCI de 25) y para pavimento de concreto de 15 (rango PCI de 35). En inspecciones subsecuentes se usará la desviación estándar real (o el rango PCI) de la inspección previa en la determinación del número mínimo de unidades que deben evaluarse.

Cuando el número mínimo de unidades a evaluar es menor que cinco ($n < 5$), todas las unidades deberán evaluarse.

Selección de las unidades de muestreo para la inspección

Se recomienda que las unidades elegidas estén igualmente espaciadas a lo largo de la sección de pavimento y que la primera de ellas se elija al azar (aleatoriedad sistemática) de la siguiente manera:

El intervalo de muestreo (i) se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$i = \frac{N}{n}$$

Donde:

N = Número total de unidades de muestreo disponible.

n = Número mínimo de unidades para evaluar.

i = Intervalo de muestreo, se redondea al número entero inferior (ej: 3,7 se redondea a 3)

La unidad de muestreo inicial se selecciona al azar entre la unidad de muestreo 1 y el intervalo de muestreo (i).

Así si $i = 3$, la unidad de muestreo a inspeccionar puede estar entre 1 y 3. Las unidades de muestreo para evaluación se identifican como (S), ($S+1$), ($S+2$), etc.

Siguiendo con el ejemplo, si la unidad inicial de muestreo para la inspección seleccionada es 2 y el intervalo de muestreo (i) es igual a 3, las siguientes unidades de muestreo a inspeccionar serían 5, 8, 11, 14, etc.

Sin embargo, si se requieren cantidades de daño exactas para pliegos de licitación, todas y cada una de las unidades de muestreo deberán ser inspeccionadas.

Selección de unidades de muestreo adicionales

Uno de los mayores inconvenientes del método aleatorio es la exclusión del proceso de inspección y evaluación de algunas unidades de muestreo en muy mal estado. También puede suceder que unidades de muestreo que tienen daños que sólo se presentan una vez (por ejemplo, “cruce de línea férrea”) queden incluidas de forma inapropiada en un muestreo aleatorio.

Para evitar lo anterior, la inspección deberá establecer cualquier unidad de muestreo inusual e inspeccionarla como una “unidad adicional” en lugar de una “unidad

representativa” o aleatoria. Cuando se incluyen unidades de muestreo adicionales, el cálculo del PCI es ligeramente modificado para prevenir la extrapolación de las condiciones inusuales en toda la sección.

Evaluación de la condición

El procedimiento varía de acuerdo con el tipo de superficie del pavimento que se inspecciona. Debe seguirse estrictamente la definición de los daños de este manual para obtener un valor del PCI confiable.

La evaluación de la condición incluye los siguientes aspectos

Equipo

- Huincha de 50 m. para medir las longitudes y las áreas de los daños.
- Regla y una cinta métrica para establecer las profundidades de los ahuellamientos o depresiones.
- Conos de seguridad vial.
- Chalecos fluorescentes de seguridad.
- Hoja de datos de campo.
- Manual de daños del PCI con los formatos correspondientes y en cantidad suficiente para el desarrollo de la actividad.

Procedimiento

Se inspecciona una unidad de muestreo para medir el tipo, cantidad y severidad de los daños de acuerdo con el Manual de Daños, y se registra la información en el formato correspondiente. Se deben conocer y seguir estrictamente las definiciones y procedimientos de medida los daños. Se usa un formulario u “hoja de información de exploración de la condición” para cada unidad muestreo y en los formatos cada renglón se usa para registrar un daño, su extensión y su nivel de severidad.

Seguridad

El equipo de inspección deberá implementar todas las medidas de seguridad para su desplazamiento en la vía inspeccionada, tales como dispositivos de señalización y advertencia para el vehículo acompañante y para el personal en la vía

Cálculo del PCI de las unidades de muestreo

Al completar la inspección de campo, la información sobre los daños se utiliza para calcular el PCI. El cálculo puede ser manual o computarizado y se basa en los “Valores Deducidos” de cada daño de acuerdo con la cantidad y severidad reportadas

Etapas 1. Determinación de los valores deducidos (VD):

- Totalizar cada tipo y nivel de severidad de daño y registrarlo en la columna TOTAL, del formato inventario de danos. El daño puede medirse en área, longitud o por número según el tipo de falla.
- Dividir la cantidad de cada clase de daño, en cada nivel de severidad, entre el área total de la unidad de muestreo, y exprese el resultado como porcentaje, esta es la densidad del daño, con el nivel de severidad especificado dentro de la unidad de estudio.
- Determinar el valor deducido para cada tipo de daño y su nivel de severidad mediante el uso de las curvas denominadas “Valor deducido del daño”.

Etapas 2. Cálculo del número máximo admisible de valores deducidos (m)

- Si ninguno ó tan sólo uno de los “Valores Deducidos” es mayor que 2, se usa el “Valor Deducido Total” en lugar del mayor “Valor Deducido Corregido”, CDV, obtenido en la Etapa 4. De lo contrario, deben seguirse los siguientes pasos.
- Listar los valores deducidos individuales deducidos de mayor a menor.
- Determinar el “Número Máximo Admisible de Valores Deducidos” (m), utilizando la siguiente ecuación:

$$m_i = 1.00 + 998100 - HDV_i$$

Donde:

m_i = Número máximo admisible de “valores deducidos”, incluyendo fracción, para la unidad de muestreo i .

HDV_i = El mayor valor deducido individual para la unidad de muestreo i .

El número de valores individuales deducidos se reduce a m , inclusive la parte fraccionaria.

Si se dispone de menos valores deducidos que m se utilizan todos los que se tengan.

Etapa 3. Cálculo del “máximo valor deducido corregido”, CDV.

El máximo CDV se determina mediante el siguiente proceso iterativo:

- Determinar el número de valores deducidos, q , mayores que 2,0.
- Determinar el “Valor Deducido Total” sumando todos los valores deducidos individuales.
- Determinar el CDV con q y el “Valor Deducido Total” en la curva de corrección pertinente al tipo de pavimento.
- Reducir a 2,0 el menor de los “Valores Deducidos” individuales que sea mayor que 2,0 y repita lo anterior hasta que q sea igual a 1.
- El máximo CDV es el mayor de los CDV obtenidos en el proceso

Etapa 4. Calcular el PCI de la unidad restando de 100 el máximo CDV obtenido en la etapa 3.

$$PCI = 100 - Max. CDV$$

Donde:

PCI = Índice de condición presente

máx. CDV = Máximo valor corregido deducido.

Tabla 5. Planilla de datos para determinar CDV

VALORES DEDUCIDOS								CDT	q	CDV
15	3							18	1	16
15	2							17	2	17

Fuente: Elaboración Propia

Cálculo del PCI de una sección de pavimento

Una sección de pavimento abarca varias unidades de muestreo. Si todas las unidades de muestreo son inventariadas, el PCI de la sección será el promedio de los PCI calculados en las unidades de muestreo.

Si se utilizó la técnica del muestreo, se emplea otro procedimiento. Si la selección de las unidades de muestreo para inspección se hizo mediante la técnica aleatoria sistemática o con base en la representatividad de la sección, el PCI será el promedio de los PCI de las

unidades de muestreo inspeccionadas. Si se usaron unidades de muestreo adicionales se usa un promedio ponderado calculado de la siguiente forma:

$$PCIS = \frac{N - Ax PCIR + A x PCIA}{N}$$

Donde:

PCIS = PCI de la sección del pavimento.

PCIR = PCI promedio de las unidades de muestreo aleatorias o representativas.

PCIA = PCI promedio de las unidades de muestreo adicionales.

N = Número total de unidades de muestreo en la sección.

A = Número adicional de unidades de muestreo inspeccionadas.

Descripción de fallas para determinar el PCI

En vista de las variaciones de severidad que presentan los distintos tipos de fallas, se ha descrito los tres niveles de severidad L: (Low: bajo); M: (Medium: medio); H: (High: alto)

1. Piel de cocodrilo

Las grietas de fatiga o piel de cocodrilo son una serie de grietas interconectadas cuyo origen es la falla por fatiga de la capa de rodadura asfáltica bajo acción repetida de las cargas de tránsito. El agrietamiento se inicia en el fondo de la capa asfáltica (o base estabilizada) donde los esfuerzos y deformaciones unitarias de tensión son mayores bajo la carga de una rueda. Inicialmente, las grietas se propagan a la superficie como una serie de grietas longitudinales paralelas. Después de repetidas cargas de tránsito, las grietas se conectan formando polígonos con ángulos agudos que desarrollan un patrón que se asemeja a una malla de gallinero o a la piel de cocodrilo. Generalmente, el lado más grande de las piezas no supera los 0,60 m.

El agrietamiento de piel de cocodrilo ocurre únicamente en áreas sujetas a cargas repetidas de tránsito tales como las huellas de las llantas. Por lo tanto, no podría producirse sobre la totalidad de un área a menos que esté sujeta a cargas de tránsito en toda su extensión. (Un patrón de grietas producido sobre un área no sujeta a cargas se denomina como “grietas en bloque”, el cual no es un daño debido a la acción de la carga).

La piel de cocodrilo se considera como un daño estructural importante y usualmente se presenta acompañado por ahuellamiento.

Niveles de severidad.

L= Grietas finas capilares y longitudinales que se desarrollan de forma paralela con unas pocas o ninguna interconectadas. Las grietas no están descascaradas, es decir, no presentan rotura del material a lo largo de los lados de la grieta.

M= Desarrollo posterior de grietas piel de cocodrilo del nivel L, en un patrón o red de grietas que pueden estar ligeramente descascaradas.

H= Red o patrón de grietas que ha evolucionado de tal forma que las piezas o pedazos están bien definidos y descascarados los bordes. Algunos pedazos pueden moverse bajo el tránsito.

Medida.

Se miden en pies cuadrados (o metros cuadrados) de área afectada. La mayor dificultad en la medida de este tipo de daño radica en que, a menudo, dos o tres niveles de severidad coexisten en un área deteriorada. Si estas porciones pueden ser diferenciadas con facilidad, deben medirse y registrarse separadamente. De lo contrario, toda el área deberá ser calificada en el mayor nivel de severidad presente.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada, sello superficial. Sobrecarpeta.

M= Parcheo parcial o en toda la profundidad (Full Depth). Sobrecarpeta. Reconstrucción.

H= Parcheo parcial o Full Depth. Sobrecarpeta. Reconstrucción.

Figura 3. Piel de cocodrilo



Fuente: Elaboración Propia

2. Exudación

La exudación es una película de material bituminoso en la superficie del pavimento, la cual forma una superficie brillante, cristalina y reflectora que usualmente llega a ser pegajosa. La exudación es originada por exceso de asfalto en la mezcla, exceso de aplicación de un sellante asfáltico o un bajo contenido de vacíos de aire. Ocurre cuando el asfalto llena los vacíos de la mezcla en medio de altas temperaturas ambientales y entonces se expande en la superficie del pavimento. Debido a que el proceso de exudación no es reversible durante el tiempo frío, el asfalto se acumulará en la superficie.

Niveles de severidad.

L= La exudación ha ocurrido solamente en un grado muy ligero y es detectable únicamente durante unos pocos días del año. El asfalto no se pega a los zapatos o a los vehículos.

M= La exudación ha ocurrido hasta un punto en el cual el asfalto se pega a los zapatos y vehículos únicamente durante unas pocas semanas del año.

H= La exudación ha ocurrido de forma extensa y gran cantidad de asfalto se pega a los zapatos y vehículos al menos durante varias semanas al año.

Medida.

Se mide en pies cuadrados (o metros cuadrados) de área afectada. Si se contabiliza la exudación no deberá contabilizarse el pulimento de agregados.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada.

M= Se aplica arena / agregados y cilindrado.

H= Se aplica arena / agregados y cilindrado (precalentando si fuera necesario).

Figura 4. Exudación



Fuente: Elaboración Propia

3. Agrietamiento en bloque

Las grietas en bloque son grietas interconectadas que dividen el pavimento en pedazos aproximadamente rectangulares. Los bloques pueden variar en tamaño de 0,30 m x 0,3 m a 3,0 m x 3,0 m. Las grietas en bloque se originan principalmente por la contracción del concreto asfáltico y los ciclos de temperatura diarios (lo cual origina ciclos diarios de esfuerzo / deformación unitaria). Las grietas en bloque no están asociadas a cargas e indican que el asfalto se ha endurecido significativamente.

Normalmente ocurre sobre una gran porción del pavimento, pero algunas veces aparecerá únicamente en áreas sin tránsito. Este tipo de daño difiere de la piel de cocodrilo en que este último forma pedazos más pequeños, de muchos lados y con ángulos agudos. También, a diferencia de los bloques, la piel de cocodrilo es originada por cargas repetidas de tránsito y, por lo tanto, se encuentra únicamente en áreas sometidas a cargas vehiculares (por lo menos en su primera etapa).

Niveles de severidad.

L= Bloques definidos por grietas de baja severidad, como se define para grietas longitudinales y transversales.

M= Bloques definidos por grietas de severidad media.

H= Bloques definidos por grietas de alta severidad.

Medida.

Se mide en pies cuadrados (o metros cuadrados) de área afectada. Generalmente, se presenta un solo nivel de severidad en una sección de pavimento; sin embargo, cualquier área de la sección de pavimento que tenga diferente nivel de severidad deberá medirse y anotarse separadamente.

Opciones de reparación.

L= Sellado de grietas con ancho mayor a 3,0 mm. Riego de sello.

M= Sellado de grietas, reciclado superficial. Escarificado en caliente y sobrecarpeta.

H= Sellado de grietas, reciclado superficial. Escarificado en caliente y sobrecarpeta.

Figura 5. Agrietamiento en bloque



Fuente: Norma ASTM D 6433-03 “Manual del PCI”

4. Abultamientos (bumps) y hundimiento (sags)

Los abultamientos son pequeños desplazamientos hacia arriba localizados en la superficie del pavimento. Se diferencian de los desplazamientos, pues estos últimos son causados por pavimentos inestables. Los abultamientos, por otra parte, pueden ser causados por varios factores, que incluyen:

1. Levantamiento o combadura de losas de concreto de cemento Pórtland con una sobrecarpeta de concreto asfáltico.
2. Expansión por congelación (crecimiento de lentes de hielo).
3. Infiltración y elevación del material en una grieta en combinación con las cargas del tránsito (algunas veces denominado “tenting”).

Los hundimientos son desplazamientos hacia abajo, pequeños y abruptos, de la superficie del pavimento.

Las distorsiones y desplazamientos que ocurren sobre grandes áreas del pavimento, causando grandes o largas depresiones en el mismo, se llaman “ondulaciones” (hinchamiento: swelling).

Niveles de severidad.

L= Los abultamientos o hundimientos originan una calidad de tránsito de baja severidad.

M= Los abultamientos o hundimientos originan una calidad de tránsito de severidad media.

H= Los abultamientos o hundimientos originan una calidad de tránsito de severidad alta.

Medida.

Se miden en pies lineales (o metros lineales). Si aparecen en un patrón perpendicular al flujo del tránsito y están espaciadas a menos de 3,0 m, el daño se llama corrugación. Si el abultamiento ocurre en combinación con una grieta, ésta también se registra.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada.

M= Reciclado en frío. Parcheo profundo o parcial.

H= Reciclado (fresado) en frío. Parcheo profundo o parcial. Sobrecarpeta.

Figura 6. Abultamiento y hundimiento



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

5. Corrugación

La corrugación (también llamada “lavadero”) es una serie de cimas y depresiones muy próximas que ocurren a intervalos bastante regulares, usualmente a menos de 3,0 m. Las cimas son perpendiculares a la dirección del tránsito. Este tipo de daño es usualmente causado por la acción del tránsito combinada con una carpeta o una base inestables. Si los abultamientos ocurren en una serie con menos de 3,0 m de separación entre ellos, cualquiera sea la causa, el daño se denomina corrugación.

Niveles de severidad.

L= Corrugaciones producen una calidad de tránsito de baja severidad.

M= Corrugaciones producen una calidad de tránsito de mediana severidad.

H= Corrugaciones producen una calidad de tránsito de alta severidad.

Medida.

Se mide en pies cuadrados (o metros cuadrados) de área afectada.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada.

M= Reconstrucción.

H= Reconstrucción.

Figura 7. Corrugación



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

6. Depresión

Son áreas localizadas de la superficie del pavimento con niveles ligeramente más bajos que el pavimento a su alrededor. En múltiples ocasiones, las depresiones suaves solo son visibles después de la lluvia, cuando el agua almacenada forma un “baño de pájaros” (bird bath). En el pavimento seco las depresiones pueden ubicarse gracias a las manchas causadas por el agua almacenada. Las depresiones son formadas por el asentamiento de la subrasante o por una construcción incorrecta. Originan alguna rugosidad y cuando son suficientemente profundas o están llenas de agua pueden causar hidroplaneo.

Los hundimientos a diferencia de las depresiones, son las caídas bruscas del nivel.

Niveles de severidad.

Máxima profundidad de la depresión:

L= 13,0 a 25,0 mm.

M= 25,0 a 51,0 mm.

H= Más de 51,0 mm.

Medida.

Se mide en pies cuadrados (o metros cuadrados) del área afectada.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada.

M= Parcheo superficial, parcial o profundo.

H= Parcheo superficial, parcial o profundo.

Figura 8. Depresión



Fuente: Norma ASTM D 6433-03 “Manual del PCI”

7. Grieta de borde

Las grietas de borde son paralelas y, generalmente, están a una distancia entre 0,30 y 0,60 m del borde exterior del pavimento. Este daño se acelera por las cargas de tránsito y puede originarse por debilitamiento, debido a condiciones climáticas, de la base o de la subrasante próximas al borde del pavimento. El área entre la grieta y el borde del pavimento se clasifica de acuerdo con la forma cómo se agrieta (a veces tanto que los pedazos pueden removerse).

Niveles de severidad.

L= Agrietamiento bajo o medio sin fragmentación o desprendimiento.

M= Grietas medias con algo de fragmentación y desprendimiento.

H= Considerable fragmentación o desprendimiento a lo largo del borde.

Medida.

La grieta de borde se mide en pies lineales (o metros lineales).

Opciones de reparación.

L= No se hace nada. Sellado de grietas con ancho mayor a 3 mm.

M= Sellado de grietas. Parcheo parcial - profundo.

H= Parcheo parcial – profundo.

Figura 9. Grieta de borde



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

8. Grieta de deflexión de junta (de losas de concreto de cemento portland)

Este daño ocurre solamente en pavimentos con superficie asfáltica construidos sobre una losa de concreto de cemento Portland. No incluye las grietas de reflexión de otros tipos de base (por ejemplo, estabilizadas con cemento o cal). Estas grietas son causadas principalmente por el movimiento de la losa de concreto de cemento Portland, inducido por temperatura o humedad, bajo la superficie de concreto asfáltico. Este daño no está relacionado con las cargas; sin embargo, las cargas del tránsito pueden causar la rotura del concreto asfáltico cerca de la grieta. Si el pavimento está fragmentado a lo largo de la grieta, se dice que aquella está descascarada. El conocimiento de las dimensiones de la losa subyacente a la superficie de concreto asfáltico ayuda a identificar estos daños.

Niveles de severidad.

L= Existe una de las siguientes condiciones:

1. Grieta sin relleno de ancho menor que 10,0 mm, o
2. Grieta rellena de cualquier ancho (con condición satisfactoria del material llenante).

M= Existe una de las siguientes condiciones:

1. Grieta sin relleno con ancho entre 10,0 mm y 76,0 mm.
2. Grieta sin relleno de cualquier ancho hasta 76,0 mm rodeada de un ligero agrietamiento aleatorio.
3. Grieta rellena de cualquier ancho rodeada de un ligero agrietamiento aleatorio.

H= Existe una de las siguientes condiciones:

1. Cualquier grieta rellena o no, rodeada de un agrietamiento aleatorio de media o alta severidad.
2. Grietas sin relleno de más de 76,0 mm.
3. Una grieta de cualquier ancho en la cual unas pocas pulgadas del pavimento alrededor de la misma están severamente fracturadas (la grieta está severamente fracturada).

Medida.

La grieta de reflexión de junta se mide en pies lineales (o metros lineales). La longitud y nivel de severidad de cada grieta debe registrarse por separado. Por ejemplo, una grieta de 15,0 m puede tener 3,0 m de grietas de alta severidad; estas deben registrarse de forma separada. Si se presenta un abultamiento en la grieta de reflexión éste también debe registrarse.

Opciones de reparación.

L= Sellado para anchos superiores a 3,00 mm.

M= Sellado de grietas. Parcheo de profundidad parcial.

H= Parcheo de profundidad parcial. Reconstrucción de la junta.

Figura 10. Grieta de deflexión de junta



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

9. Desnivel carril / berma

El desnivel carril / berma es una diferencia de niveles entre el borde del pavimento y la berma. Este daño se debe a la erosión de la berma, el asentamiento berma o la colocación de sobrecarpetas en la calzada sin ajustar el nivel de la berma.

Niveles de severidad.

L= La diferencia en elevación entre el borde del pavimento y la berma está entre 25,0 y 51,0 mm.

M= La diferencia está entre 51,0 mm y 102,0 mm.

H= La diferencia en elevación es mayor que 102,00 mm.

Medida.

El desnivel carril / berma se miden en pies lineales (o metros lineales).

Opciones de reparación.

L, M, H= Renivelación de las bermas para ajustar al nivel del carril.

Figura 11. Desnivel de carril/berma



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

10. Grietas longitudinales y transversales

Las grietas longitudinales son paralelas al eje del pavimento o a la dirección de construcción y pueden ser causadas por:

1. Una junta de carril del pavimento pobremente construida.
2. Contracción de la superficie de concreto asfáltico debido a bajas temperaturas o al endurecimiento del asfalto o al ciclo diario de temperatura.
3. Una grieta de reflexión causada por el agrietamiento bajo la capa de base, incluidas las grietas en losas de concreto de cemento Portland, pero no las juntas de pavimento de concreto.

Las grietas transversales se extienden a través del pavimento en ángulos aproximadamente rectos al eje del mismo o a la dirección de construcción. Usualmente, este tipo de grietas no está asociado con carga.

Niveles de severidad.

L= Existe una de las siguientes condiciones:

1. Grieta sin relleno de ancho menor que 10,0 mm.
2. Grieta rellena de cualquier ancho (con condición satisfactoria del material llenante).

M= Existe una de las siguientes condiciones:

1. Grieta sin relleno de ancho entre 10,0 mm y 76,0 mm.
2. Grieta sin relleno de cualquier ancho hasta 76,0 mm, rodeada grietas aleatorias pequeñas.
3. Grieta rellena de cualquier ancho, rodeada de grietas aleatorias pequeñas.

H= Existe una de las siguientes condiciones:

1. Cualquier grieta rellena o no, rodeada de grietas aleatorias pequeñas de severidad media o alta.
2. Grieta sin relleno de más de 76,0 mm de ancho.
3. Una grieta de cualquier ancho en la cual unas pocas pulgadas del pavimento alrededor de la misma están severamente fracturadas.

Medida.

Las grietas longitudinales y transversales se miden en pies lineales (o metros lineales). La longitud y severidad de cada grieta debe registrarse después de su identificación. Si la

grieta no tiene el mismo nivel de severidad a lo largo de toda su longitud, cada porción de la grieta con un nivel de severidad diferente debe registrarse por separado. Si ocurren abultamientos o hundimientos en la grieta, éstos deben registrarse.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada. Sellado de grietas de ancho mayor que 3,0 mm.

M= Sellado de grietas.

H= Sellado de grietas. Parcheo parcial.

Figura 12. Grieta longitudinal y transversal



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

11. Parcheo

Un parche es un área de pavimento la cual ha sido reemplazada con material nuevo para reparar el pavimento existente. Un parche se considera un defecto no importa qué tan bien se comporte (usualmente, un área parchada o el área adyacente no se comportan tan bien como la sección original de pavimento). Por lo general se encuentra alguna rugosidad está asociada con este daño.

Niveles de severidad.

L= El parche está en buena condición y es satisfactorio. La calidad del tránsito se califica como de baja severidad o mejor.

M= El parche está moderadamente deteriorado o la calidad del tránsito se califica como de severidad media.

H= El parche está muy deteriorado o la calidad del tránsito se califica como de alta severidad. Requiere pronta sustitución.

Medida.

Los parches se miden en pies cuadrados (o metros cuadrados) de área afectada. Sin embargo, si un solo parche tiene áreas de diferente severidad, éstas deben medirse y registrarse de forma separada. Por ejemplo, un parche de 2,32 m² puede tener 0,9 m² de severidad media y 1,35 m² de baja severidad. Estas áreas deben registrarse separadamente. Ningún otro daño (por ejemplo, desprendimiento y agrietamiento) se registra dentro de un parche; aun si el material del parche se está desprendiendo o agrietando, el área se califica únicamente como parche. Si una cantidad importante de pavimento ha sido reemplazada, no se debe registrar como un parche sino como un nuevo pavimento (por ejemplo, la sustitución de una intersección completa).

Opciones de reparación.

L= No se hace nada.

M= No se hace nada. Sustitución del parche.

H= Sustitución del parche

Figura 13. Parcheo



Fuente: Elaboración Propia

12. Pulimiento de agregados

Este daño es causado por la repetición de cargas de tránsito. Cuando el agregado en la superficie se vuelve suave al tacto, la adherencia con las llantas del vehículo se reduce considerablemente. Cuando la porción de agregado que está sobre la superficie es pequeña, la textura del pavimento no contribuye de manera significativa a reducir la velocidad del vehículo. El pulimiento de agregados debe contarse cuando un examen revela que el agregado que se extiende sobre la superficie es degradable y que la superficie del mismo es suave al tacto. Este tipo de daño se indica cuando el valor de un ensayo de resistencia al deslizamiento es bajo o ha caído significativamente desde una evaluación previa.

Niveles de severidad.

No se define ningún nivel de severidad. Sin embargo, el grado de pulimiento deberá ser significativo antes de ser incluido en una evaluación de la condición y contabilizado como defecto.

Medida.

Se mide en pies cuadrados (o metros cuadrados) de área afectada. Si se contabiliza exudación, no se tendrá en cuenta el pulimiento de agregados.

Opciones de reparación.

L, M, H= No se hace nada. Tratamiento superficial. Sobrecarpeta. Fresado y sobrecarpeta.

Figura 14. Pulimiento de agregados



Fuente: Norma ASTM D 6433-03 “Manual del PCI”

13. Huecos

Los huecos son depresiones pequeñas en la superficie del pavimento, usualmente con diámetros menores que 0,90 m y con forma de tazón. Por lo general presentan bordes aguzados y lados verticales en cercanías de la zona superior. El crecimiento de los huecos se acelera por la acumulación de agua dentro del mismo. Los huecos se producen cuando el tráfico arranca pequeños pedazos de la superficie del pavimento. La desintegración del pavimento progresa debido a mezclas pobres en la superficie, puntos débiles de la base o la subrasante, o porque se ha alcanzado una condición de piel de cocodrilo de severidad alta. Con frecuencia los huecos son daños asociados a la condición de la estructura y no deben confundirse con desprendimiento o meteorización. Cuando los huecos son producidos por piel de cocodrilo de alta severidad deben registrarse como huecos, no como meteorización.

Niveles de severidad.

Los niveles de severidad para los huecos de diámetro menor que 762 mm están basados en la profundidad y el diámetro de los mismos, de acuerdo con la tabla.

Si el diámetro del hueco es mayor que 762 mm, debe medirse el área en pies cuadrados (o metros cuadrados) y dividirla entre 5 pies² (0,47 m²) para hallar el número de huecos equivalentes. Si la profundidad es menor o igual que 25,0 mm, los huecos se consideran como de severidad media. Si la profundidad es mayor que 25,0 mm la severidad se considera como alta

Tabla 6. Niveles de severidad para huecos

Profundidad máxima del hueco	Diámetro medio (mm)		
	102 a 203 mm	203 a 457 mm	457 a 762 mm
12,7 a 25,4 mm	L	L	M
>25,4 a 50,8 mm	L	M	H
>50,8 mm	M	M	H

Fuente: Norma ASTM D 6433-03 “Manual del PCI”

Medida.

Los huecos se miden contando aquellos que sean de severidades baja, media y alta, y registrándolos separadamente.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada. Parcheo parcial o profundo.

M= Parcheo parcial o profundo.

H= Parcheo profundo

Figura 15. Huecos



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

14. Cruce de vía férrea

Los defectos asociados al cruce de vía férrea son depresiones o abultamientos alrededor o entre los rieles.

Niveles de severidad.

L= El cruce de vía férrea produce calidad de tránsito de baja severidad.

M= El cruce de vía férrea produce calidad de tránsito de severidad media.

H= El cruce de vía férrea produce calidad de tránsito de severidad alta.

Medida.

El área del cruce se mide en pies cuadrados (o metros cuadrados) de área afectada. Si el cruce no afecta la calidad de tránsito, entonces no debe registrarse. Cualquier abultamiento considerable causado por los rieles debe registrarse como parte del cruce.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada.

M= Parcheo superficial o parcial de la aproximación. Reconstrucción del cruce.

H= Parcheo superficial o parcial de la aproximación. Reconstrucción del cruce.

Figura 16. Cruce de vía férrea



Fuente: Norma ASTM D 6433-03 “Manual del PCI”

15. Ahuellamiento

El ahuellamiento es una depresión en la superficie de las huellas de las ruedas. Puede presentarse el levantamiento del pavimento a lo largo de los lados del ahuellamiento, pero, en muchos casos, éste solo es visible después de la lluvia, cuando las huellas estén llenas de agua. El ahuellamiento se deriva de una deformación permanente en cualquiera de las capas del pavimento o la subrasante, usualmente producida por consolidación o movimiento lateral de los materiales debido a la carga del tránsito. Un ahuellamiento importante puede conducir a una falla estructural considerable del pavimento.

Niveles de severidad.

Profundidad media del ahuellamiento:

L= 6,0 a 13,0 mm.

M= >13,0 mm a 25,0 mm.

H= > 25,0 mm.

Medida.

El ahuellamiento se mide en pies cuadrados (o metros cuadrados) de área afectada y su severidad está definida por la profundidad media de la huella. La profundidad media del ahuellamiento se calcula colocando una regla perpendicular a la dirección del mismo,

midiendo su profundidad, y usando las medidas tomadas a lo largo de aquél para calcular su profundidad media.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada. Fresado y sobrecarpeta.

M= Parcheo superficial, parcial o profundo. Fresado y sobrecarpeta.

H= Parcheo superficial, parcial o profundo. Fresado y sobrecarpeta.

Figura 17. Ahuellamiento



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

16. Desplazamiento

El desplazamiento es un corrimiento longitudinal y permanente de un área localizada de la superficie del pavimento producido por las cargas del tránsito. Cuando el tránsito empuja contra el pavimento, produce una onda corta y abrupta en la superficie. Normalmente, este daño solo ocurre en pavimentos con mezclas de asfalto líquido inestables (cutback o emulsión).

Los desplazamientos también ocurren cuando pavimentos de concreto asfáltico confinan pavimentos de concreto de cemento Portland. La longitud de los pavimentos de concreto de cemento Portland se incrementa causando el desplazamiento.

Niveles de severidad.

L= El desplazamiento causa calidad de tránsito de baja severidad.

M= El desplazamiento causa calidad de tránsito de severidad media.

H= El desplazamiento causa calidad de tránsito de alta severidad.

Medida.

Los desplazamientos se miden en pies cuadrados (o metros cuadrados) de área afectada. Los desplazamientos que ocurren en parches se consideran para el inventario de daños como parches, no como un daño separado.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada. Fresado.

M= Fresado. Parcheo parcial o profundo.

H= Fresado. Parcheo parcial o profundo.

Figura 18. Desplazamiento



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

17. Grietas parabólicas (SLIPPAGE)

Las grietas parabólicas por deslizamiento (slippage) son grietas en forma de media luna creciente. Son producidas cuando las ruedas que frenan o giran inducen el deslizamiento o la deformación de la superficie del pavimento. Usualmente, este daño ocurre en presencia de una mezcla asfáltica de baja resistencia, o de una liga pobre entre la superficie y la capa siguiente en la estructura de pavimento. Este daño no tiene relación alguna con procesos de inestabilidad geotécnica de la calzada.

Nivel de severidad.

L= Ancho promedio de la grieta menor que 10,0 mm.

M= Existe una de las siguientes condiciones:

1. Ancho promedio de la grieta entre 10,0 mm y 38,0 mm.
2. El área alrededor de la grieta está fracturada en pequeños pedazos ajustados.

H= Existe una de las siguientes condiciones:

1. Ancho promedio de la grieta mayor que 38,0 mm.
2. El área alrededor de la grieta está fracturada en pedazos fácilmente removibles.

Medida.

El área asociada con una grieta parabólica se mide en pies cuadrados (o metros cuadrados) y se califica según el nivel de severidad más alto presente en la misma.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada. Parcheo parcial.

M= Parcheo parcial.

H= Parcheo parcial.

Figura 19. Grietas parabólicas



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

18. Hinchamiento

El hinchamiento se caracteriza por un pandeo hacia arriba de la superficie del pavimento una onda larga y gradual con una longitud mayor que 3,0 m. El hinchamiento puede estar

acompañado de agrietamiento superficial. Usualmente, este daño es causado por el congelamiento en la subrasante o por suelos potencialmente expansivos.

Nivel de severidad.

L= El hinchamiento causa calidad de tránsito de baja severidad. El hinchamiento de baja severidad no es siempre fácil de ver, pero puede ser detectado conduciendo en el límite de velocidad sobre la sección de pavimento. Si existe un hinchamiento se producirá un movimiento hacia arriba.

M= El hinchamiento causa calidad de tránsito de severidad media.

H= El hinchamiento causa calidad de tránsito de alta severidad.

Medida.

El hinchamiento se mide en pies cuadrados (o metros cuadrados) de área afectada.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada.

M= No se hace nada. Reconstrucción.

H= Reconstrucción.

Figura 20. Hinchamiento.



Fuente: Norma ASTM D 6433-03 “Manual del PCI”

19. Meteorización / desprendimiento de agregados

La meteorización y el desprendimiento son la pérdida de la superficie del pavimento debido a la pérdida del ligante asfáltico y de las partículas sueltas de agregado. Este daño

indica que, o bien el ligante asfáltico se ha endurecido de forma apreciable, o que la mezcla presente es de pobre calidad.

Además, el desprendimiento puede ser causado por ciertos tipos de tránsito, por ejemplo, vehículos de orugas. El ablandamiento de la superficie y la pérdida de los agregados debido al derramamiento de aceites también se consideran como desprendimiento.

Niveles de severidad.

L= Han comenzado a perderse los agregados o el ligante. En algunas áreas la superficie ha comenzado a deprimirse. En el caso de derramamiento de aceite, puede verse la mancha del mismo, pero la superficie es dura y no puede penetrarse con una moneda.

M= Se han perdido los agregados o el ligante. La textura superficial es moderadamente rugosa y ahuecada. En el caso de derramamiento de aceite, la superficie es suave y puede penetrarse con una moneda.

H= Se han perdido de forma considerable los agregados o el ligante. La textura superficial es muy rugosa y severamente ahuecada. Las áreas ahuecadas tienen diámetros menores que 10,0 mm y profundidades menores que 13,0 mm; áreas ahuecadas mayores se consideran huecos. En el caso de derramamiento de aceite, el ligante asfáltico ha perdido su efecto ligante y el agregado está suelto.

Medida.

La meteorización y el desprendimiento se miden en pies cuadrados (o metros cuadrados) de área afectada.

Opciones de reparación.

L= No se hace nada. Sello superficial. Tratamiento superficial.

M= Sello superficial. Tratamiento superficial. Sobrecarpeta.

H= Tratamiento superficial. Sobrecarpeta. Reciclaje. Reconstrucción.

Para los niveles M y H, si el daño es localizado, por ejemplo, por derramamiento de aceite, se hace parcheo parcial.

Figura 21. Meteorización/desprendimiento de agregados



Fuente: Elaboración Propia

2.3.1.2. Método IRI (Índice de Regularidad Internacional)

El IRI es un indicador estadístico de la irregularidad superficial del pavimento representa la diferencia entre el perfil longitudinal teórico (resta o parabólica continua perfecta, $IRI=0$) y el perfil longitudinal real existente en el instante de la medida. Las diferencias entre los perfiles (irregularidades) obedecen principalmente al proceso constructivo y a la utilización de la carretera

La sociedad americana de ensayos y materiales (ASTM) en la norma E-867 define la rugosidad como la desviación de la superficie del pavimento respecto a una superficie plan que afecta la dinámica de los vehículos, la calidad de los viajes, las cargas dinámicas y drenaje. La rugosidad también puede ser definida como la distorsión de la superficie de la vía que causa aceleraciones verticales indeseables contribuyendo a la comodidad del viaje (Pradena M., 2006).

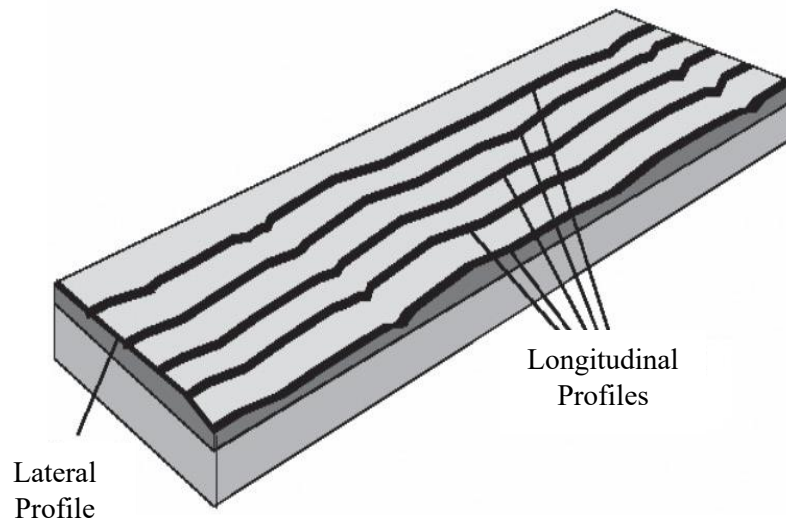
Determinación del IRI

El IRI se determina mediante un cálculo matemático realizado con las ordenadas o cotas de una línea del perfil longitudinal, obtenidas por cualquier técnica o equipo de medida del perfil longitudinal.

Por lo tanto, la determinación del IRI no considera el perfil transversal, y si considera cualquier tipo de deterioro o singularidad (algún tipo de escalamiento baches, gran densidad de grietas/o pérdida de áridos, entre otros) que afectan la medida del perfil longitudinal.

El IRI es calculado a partir de un solo perfil, y en este el movimiento de la suspensión simulada es acumulada y dividida por el largo del perfil para así obtener el valor del IRI; es de esta forma que el IRI es expresado generalmente en unidades de m/km o in/mi.

Figura 22. Perfiles del camino



Fuente: Pradena M., M. (2006). "Análisis de Regularidad Superficial en Caminos Pavimentados"

Modelo del cuarto de carro (Quarter Car o Golden Car)

El llamado cuarto de coche, simula que al avanzar este modelo a una velocidad determinada (80km/h) e ir siguiendo las irregularidades del camino, las masas se mueven en vertical (simulando el asiento del conductor). Los neumáticos se transmite los efectos de la capa de rodadura (Input) a la suspensión. Los amortiguadores están colocados sobre el mismo eje donde se colocan los neumáticos. Todo el peso (masa) adicional del vehículo está apoyado sobre el sistema de suspensión formado por amortiguadores y resortes. Lo que nosotros sentimos (output) son las vibraciones transmitidas por el asiento y el timón. La interpretación del modelo matemático "cuarto de coche" o "Quarter Car" como muestra en la figura.

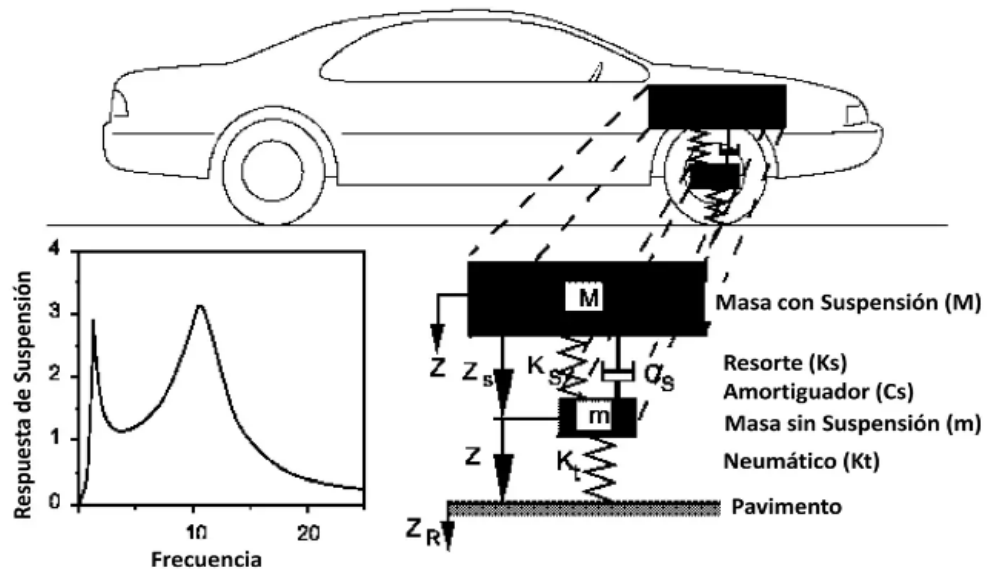
Figura 23. Sistemas de suspensión formados por amortiguadores y resortes



Fuente: Pradena M., M. (2006). "Análisis de Regularidad Superficial en Caminos Pavimentados"

El modelo "cuarto de coche" representa una esquina del vehículo, el cual predice la respuesta de un neumático y el sistema de suspensión a un perfil, con el peso soportado por la suspensión. EL IRI es un índice que expresa la relación de los movimientos acumulados por la suspensión de un vehículo a una distancia recorrida. El IRI es más sensible para longitud de ondas de 1 a 30 m. Con puntos máximos a los 2.30 y 15.78 m

Figura 24. Modelo "cuarto de coche"



Fuente: Pradena M., M. (2006). "Análisis de Regularidad Superficial en Caminos Pavimentados"

2.3.1.2.1. Método IRI con el Rugosímetro de Merlín

El Merlín es un equipo de aplicación manual cuyo principio se basa en usar la distribución de las desviaciones de la superficie a una cuerda promedio. Según el procedimiento se ha definido que es necesario medir 200 desviaciones respecto a la cuerda promedio en forma consecutiva a lo largo de la vía y considerar un intervalo constante entre cada medición. Para dichas condiciones se tiene que, a mayor rugosidad de la superficie, mayor es la variabilidad de los desplazamientos (Corros B., Urbaz P., & Corredor M., 2009).

El Merlín tiene dos pies, separados uno de otro una distancia de 1.8m, el cual se apoya en la superficie del camino cuya rugosidad será medida a lo largo de la marca hecha por las ruedas. Un patín de prueba móvil se pone a media -vía sobre la superficie de camino entre los dos pies y el Merlín mide la distancia vertical “y” entre la superficie del camino y el punto medio de una línea imaginaria de longitud constante que une la base de los dos pies.

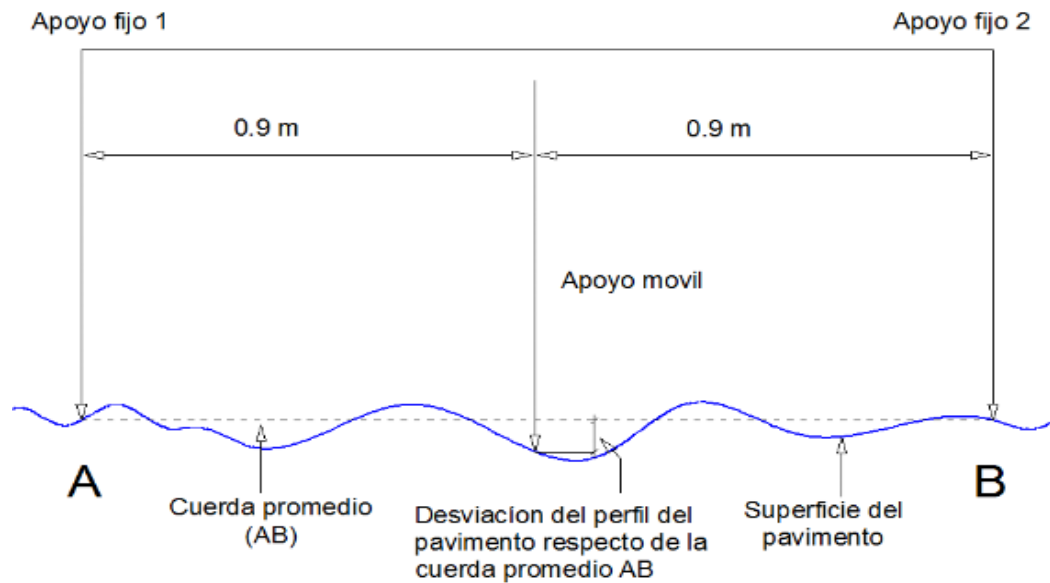
Figura 25. Rugosímetro de Merlín empleado para los ensayos



Fuente: Elaboración Propia.

El resultado se registra en un formato montado sobre la máquina, tomando medidas repetidas a lo largo de la huella de la rueda cuando se han completado las observaciones, se remueve el formato, en el cual se habrá generado un histograma. El “ancho” del histograma (D), expresado en milímetros representa la rugosidad en la escala de MERLIN (Rodríguez, Torrez, & Villeda, 2019).

Figura 26. Medición de la superficie del pavimento respecto de la cuerda promedio

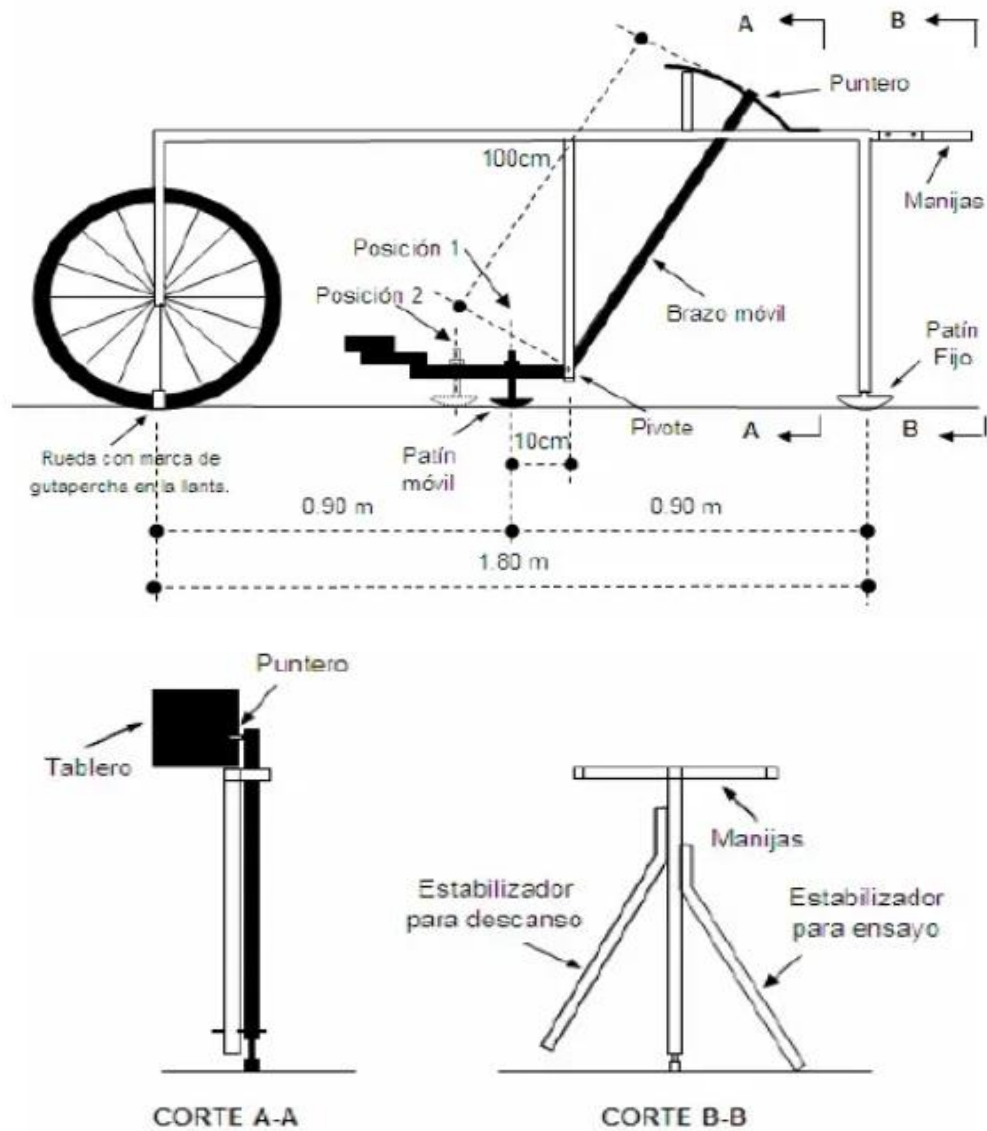


Fuente: Rodríguez, E. V., Torrez, L., & Villeda, M. (2019). "desarrollo de metodología para la medición IRI mediante el uso de un rugosímetro basado en el Merlín "

Descripción del equipo

El MERLIN es un equipo de diseño simple. Conta de un marco formado por dos elementos verticales y uno horizontal. Para facilidad de desplazamiento y operación el elemento vertical delantero es una rueda, mientras que el trasero tiene adosados lateralmente dos soportes inclinados, unos en el lado derecho para fijar el equipo sobre el suelo durante los ensayos y otro en el lado izquierdo para descansar el equipo. El elemento horizontal se proyecta, hacia la parte trasera, con 2 manijas que permiten levantar y movilizar el equipo, haciendo rodar sobre la rueda en forma similar a una carretilla. Aproximadamente en la parte central del elemento horizontal, se proyecta hacia abajo una barra vertical que no llega al piso, en cuyo extremo inferior pivotea un barco móvil. El extremo inferior del brazo móvil está en contacto directo con el piso, mediante un patín empernado y ajustable, el cual se adecua a las imperfecciones del terreno, mientras que el extremo superior termina en un punto o indicador que se desliza sobre el borde de un tablero, de acuerdo a la posición que adopta el extremo inferior del patín móvil al entrar en contacto con el pavimento.

Figura 27. Esquema del Rugosímetro MERLIN



Fuente: Rodríguez, P. "Manual de la Metodología para la determinación de la rugosidad de los pavimentos"

Procedimiento de campo

- a) Calibración de equipo
- b) personal requerido
 - un operador del equipo
 - un ayudante (para anotar lecturas)
 - personal de seguridad

c) medición

para la ejecución de los ensayos se debe seleccionar un tramo aproximadamente 400 m de longitud, sobre un determinado canal de la vía. Se deben efectuar 200 mediciones estacionando el equipo a intervalos regulares, generalmente cada 2 m. de separación. En la práctica esto se realiza tomando referencia la circunferencia de la rueda del Merlín, que es aproximadamente esa dimensión, es decir, cada ensayo se realiza al concluir una vuelta de la rueda. Para ello se coloca una señal o marca llamativa sobre la rueda, la cual debe quedar siempre en contacto con el piso. Ello facilita la labor del operador quien, una vez hecha la lectura, levanta el equipo y controla que la llanta gire a una vuelta haciendo coincidir nuevamente la marca sobre el piso.

La prueba empieza estacionando el equipo al inicio del trecho de ensayo, el operador espera que el puntero se estabilice y observa la posición que adopta respecto a la escala colocada sobre el tablero, realizando así la lectura. Paso seguido, el operador toma el instrumento por las manijas, elevándolo y desplazando la distancia constante seleccionada para usarse entre un ensayo y otro (una vuelta de la rueda). En la nueva ubicación se repite la operación y así sucesivamente hasta completar las 200 lecturas. El espaciado entre los ensayos no es un factor crítico, pero es recomendable que las lecturas se realicen siempre estacionando la rueda en una misma posición (Corros B., Urbaez P., & Corredor M., 2009).

Metodología para determinación del IRI con rugosímetro de Merlín

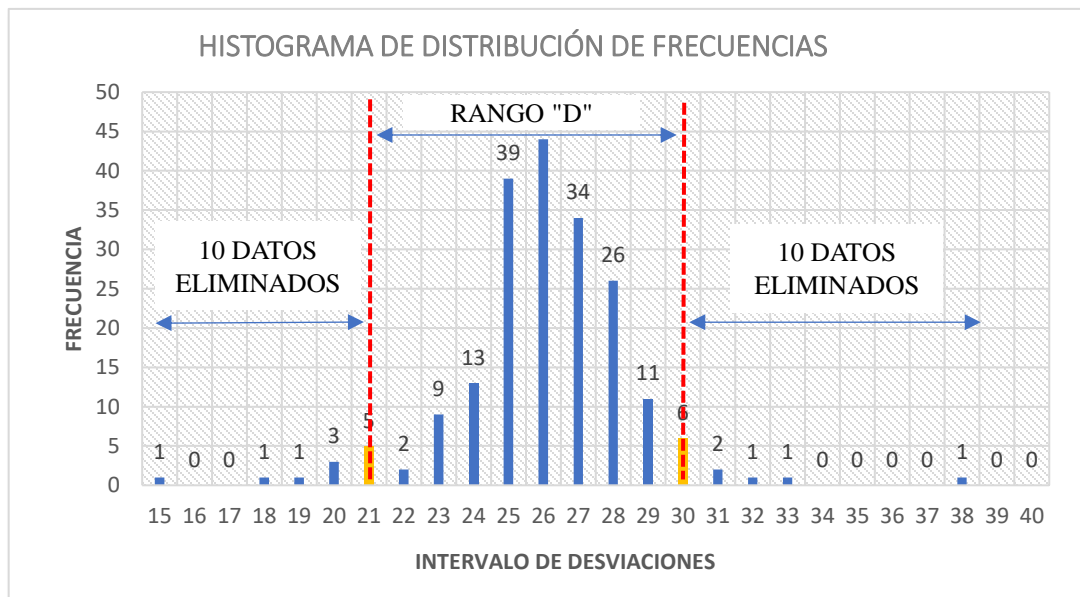
La determinación de la rugosidad de un pavimento se basa en el concepto de usar la distribución de las desviaciones de la superficie respecto de una cuerda promedio. El Merlín mide el desplazamiento vertical entre la superficie del camino y el punto medio de una línea imaginaria de longitud constante. El desplazamiento es conocido como “la desviación respecto a la cuerda promedio.

- **Histograma de la distribución de frecuencia**

Medir 200 desviaciones respecto de la cuerda promedio, en forma consecutiva a lo largo de la vía y considerar un intervalo constante entre cada medición. Para dichas condiciones

se tiene que, a mayor rugosidad de la superficie mayor es la variabilidad de los desplazamientos. Si se define el histograma de la distribución de frecuencias de las 200 mediciones, es posible medir la dispersión de las desviaciones y correlacionarla con la escala estándar de la rugosidad. El parámetro estadístico que establece la magnitud de la dispersión es el Rango de la muestra (D), determinado luego de efectuar una depuración del 10% de observaciones (10 datos en cada cola del histograma). El valor D es la rugosidad del pavimento en “unidades MERLIN”.

Figura 28. Histograma de distribución de frecuencias



Fuente: Elaboración Propia

- **Correlaciones D versus IRI**

Para relacionar la rugosidad obtenida con el Merlín con el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) se deben usar las siguientes ecuaciones de correlación.

Cuando $2,4 < IRI < 15,9$ entonces $IRI = 0,593 + 0,0471$

Cuando $IRI < 2,4$ entonces $IRI = 0,0485$

La primera ecuación es una ecuación primigenia del TRRL, resultado de las investigaciones del banco mundial en el año 1982, la segunda ecuación es el resultado de las investigaciones en el Perú, el cual debe ser aplicado a pavimentos nuevos o en buen estado, tal como indica la condición de su utilización en la expresión segunda.

Según la clasificación de equipos para medición de la regularidad superficial de pavimentos, propuesta por el Banco Mundial, el Merlín pertenece a la Clase 1, por obtener resultados muy exactos solo superado por el método de Mira y Nivel y además de ser una variación del perfilómetro estático.

- **Planilla de campo**

Las anotaciones de las observaciones realizadas deben ser hechas en una planilla. Los datos recolectados se deben representar en un histograma como parte del trabajo de gabinete de la evaluación de la rugosidad del pavimento.

Tabla 7. Planilla para toma de datos de campo

Datos de campo con la Rueda de Merlín										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										

Fuente: Elaboración Propia

Procedimiento de Cálculo del Índice de regularidad internacional

La dispersión de los datos obtenidos con el Merlín se analiza calculando la distribución de frecuencias de las lecturas o posiciones adoptadas por el puntero, la cual puede expresarse, para fines didácticos, en forma de histograma. Posteriormente se establece el Rango de los valores agrupados en intervalos de frecuencia (D), luego de descartarse el 10% de datos que correspondan a posiciones del puntero poco representativas o erráticas.

En la práctica se elimina 5% (10 datos) del extremo inferior del histograma y 5% (10 datos) del extremo superior. Efectuado el descarte de datos, se calcula el “ancho del histograma” en unidades de la escala, considerando las fracciones que pudiesen resultar como consecuencia de la eliminación de los datos. Debemos de tener en cuenta que cuando en el tablero el puntero indica valores cercanos a 25, el pavimento es menos rugoso y si en cambio está muy alejado de 25, indica que el pavimento presenta muchas imperfecciones. El rango obtenido del histograma debe ser convertido a milímetros (mm), para lo cual se multiplica con el valor de cada unidad (5mm), cuando se llega a este punto se ha calculado la rugosidad en escala MERLIN en cual debe ser convertido a escala IRI.

Cálculo de factor de corrección f_c :

$$f_c = \left(\frac{(E_p * 10)}{(L_i - L_f) * 5} \right)$$

Donde:

F_c = factor de corrección

E_p = espesor de la pastilla

L_i = posesión inicial del puntero

L_f =posesión final

Cálculo del rango corregido D_c :

$$D_c = D * f_c$$

Donde:

D_c =Rango corregido

D = Rango de los valores agrupados

F_c = Factor de corrección

Determinación de la rugosidad en la escala del IRI

1. Para pavimentos nuevos o en buen estado:

$$I. R. I. = 0.0485 * D_c \quad (IRI < 2.4)$$

2. Para pavimentos con varios años de servicio o en mal estado:

$$I. R. I. = 0,593 + 0,0471 * D_c \quad (2.4 < IRI < 15.9)$$

2.3.1.3. Método IFI (Índice de Fricción Internacional)

2.3.1.3.1. Resistencia al deslizamiento

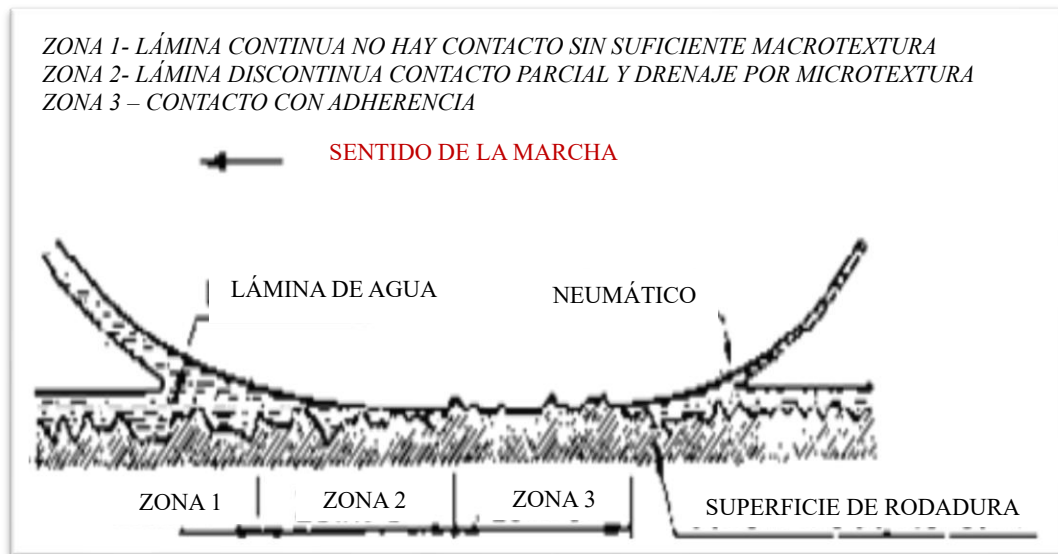
El deslizamiento de un vehículo se produce de dos direcciones, cada una de las cuales son diferentes en cuanto a las leyes que lo rigen:

- Deslizamiento en dirección longitudinal en dirección de marcha del vehículo, ocurre cuando se aplica un esfuerzo de frenado. En las resistencias al deslizamiento longitudinal intervienen fundamentalmente dos componentes:
 - a) El rozamiento por adherencia neumático – pavimento
 - b) La pérdida de energía debido a la histéresis del neumático, es decir, el neumático no absorbe toda la energía aplicada; siempre existe pérdida de energía que se transforma en calor, esto ocurre con materiales elásticos como el caucho
- Deslizamiento en dirección transversal al eje de la vía. Se producen esfuerzos tangenciales que deben ser compensados con las fuerzas de rozamiento transversal

La fricción o adherencia entre el neumático y la superficie del pavimento presenta respuestas diferentes según la influencia de factores tales como:

- La película de agua sobre la superficie del pavimento. Actúa como lubricante y disminuye el contacto neumático-pavimento como se muestra en la figura las diferentes zonas que se originan alrededor de un neumático.

Figura 29. Condiciones de contacto entre una rueda en movimiento y una superficie mojada



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Caracterización de la superficie

La textura tiene un rol muy importante en la evacuación del agua en el sistema neumático – pavimento y afecta directamente a la adherencia entre los neumáticos del vehículo y la capa de rodadura, estos aspectos de la textura son determinantes en la seguridad de circulación, puesto que son los que mantienen al vehículo en la vía al momento de frenado en o en una curva en cualquier lugar aun cuando esta se encuentre bajo los efectos de la lluvia. Esta textura se ve disminuida en el tiempo por los efectos del tráfico que genera pulimento de los agregados y otros tipos de falla que disminuyen la adherencia entre el vehículo y el pavimento. La textura también influye directamente en los niveles de sonoridad que percibe tanto el usuario al interior de su vehículo, como también el ruido que produce en el exterior que afecta la calidad de vida de las áreas pobladas que son adyacentes a la carretera. En el aspecto económico afecta en el consumo de combustible, el desgaste de los vehículos y principalmente en el desgaste de los neumáticos. Las características de resistencia al deslizamiento de un pavimento, se puede definir considerando que la

adherencia superficial está determinada por dos tipos de condiciones: microtextura y macrotextura.

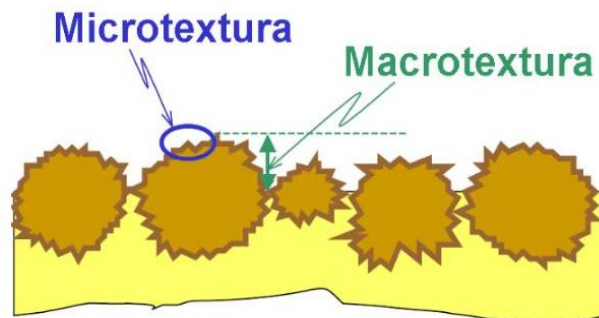
La Microtextura

Es la característica propia del árido expuesto sobre la superficie de los pavimentos, afecta el nivel de fricción en el área de contacto entre el neumático y el pavimento, ya que entre más áspera sea la superficie menos tiempo le tomaría al automóvil de cierta velocidad inicial llegar a 0, factor que se refleja en un mayor gasto en el neumático. Permite una adecuada adherencia gracias a penetración de la película de agua entre el neumático y el pavimento. Presenta una longitud de onda de 0-0,5 mm y una amplitud de 0,01-0,5 mm.

La Macrotextura

Depende del tamaño máximo de los agregados y de la composición de la mezcla, riego o lechada asfáltica o del tratamiento de superficie dado a la capa de concreto. En el caso de mezclas drenantes o tratamientos superficiales, la macrotextura será del tipo grueso, mientras que, en el caso de mezclas densas convencionales, la macrotextura será más bien fina. Proporciona canales de escape para el agua superficial del área de contacto entre el neumático y el pavimento, de esta forma ofrece una adecuada resistencia a altas velocidades sobre pavimentos mojados. Presenta una longitud de onda de 0,5-50 mm y una amplitud de 0,01-20 mm.

Gráfico 4. Diferencias entre microtextura y macrotextura



Fuente: Barraza, G. (2004). "Resistencia al deslizamiento en pavimentos flexibles
Propuesta de Norma Peruana"

Procedimiento de cálculo del IFI

a) Determinación de la textura del pavimento

$$H = \frac{4 * V}{\pi * D^2}$$

Donde:

H=Tx: la altura de la textura media

V= volumen de arena utilizada $V= 25 \text{ cm}^3=25000 \text{ mm}^3$

D= diámetro medio del círculo de arena

b) Determinación de la constante de velocidad Sp.

$$Sp = a + bxTx$$

Donde:

Las constantes a y b según norma ASTM E965

c) Determinación del parámetro F60.

$$FR60 = FRs \times e^{\frac{S-60}{Sp}}$$

$$F60 = A + BxFR60$$

Donde:

FRs= valor de la fricción obtenida en campo

S= velocidad de operación del péndulo = 10 km/hr

Sp= constante de velocidad

Las constantes A y B según norma ASTM E 274

d) Finalmente se puede calcular la fricción a cualquier velocidad.

$$F(S) = F60 \times e^{\frac{60-S}{Sp}}$$

Donde:

F(60)= la fricción a una velocidad de 60 km/hr. (calculado en el modelo)

S= velocidad a la que se quiere calcular la fricción

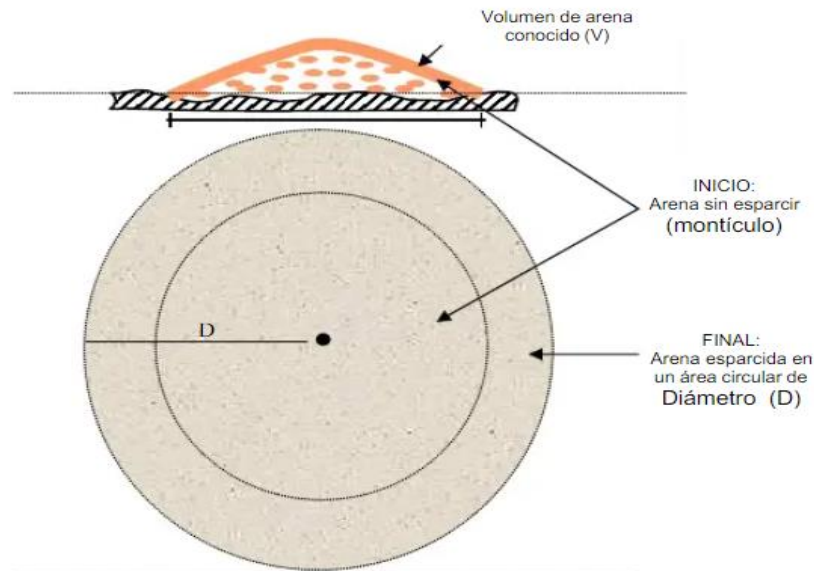
F(S)= fricción encontrada a partir de la velocidad.

2.3.1.3.2. Macrotextura con el ensayo del círculo de arena

El ensayo consiste en extender en forma circular sobre la superficie del pavimento un volumen conocido de arena fina de granulometría uniforme o esferas de vidrio, cubriendo

todas las irregularidades de la superficie (rellenando todas las depresiones) quedando enrasado de arena con los picos o proyecciones de la superficie (Corros B., Urbaez P., & Corredor M., 2009).

Figura 30. Círculo de arena



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Procedimiento de ensayo del círculo de arena

- Debe limpiarse la superficie del pavimento donde se realizará el ensayo, debe encontrarse seca y limpia, de forma que la arena se pueda esparcir libremente sobre la superficie y la medida representa el estado real del pavimento.
- Con la ayuda de la cara plana de goma del tapón se extiende con movimiento circular y asegurándose de que la arena ocupe todos los vacíos generados por las depresiones.
- Se mide el diámetro del círculo de arena con regla.
- Se debe proteger del viento al momento en que se esté desarrollando el ensayo: previamente se debe realizar la inspección visual a modo de determinar los sectores homogéneos en los que se realiza el ensayo.

Metodología de calculo

Determinación diámetro promedio

$$Dp = \frac{(D1 + D2 + D3 + D4 + D5)}{5}$$

Donde:

Dp= diámetro promedio (mm).

D= Diámetro de las lecturas (mm)

Cálculo de MTD

$$MTD = \frac{4 * V}{\pi * DP^2}$$

Donde:

MTD= Profundidad media de la macrotextura (mm)

V= volumen de la arena utilizada (mm³)

Dp= diámetro promedio (mm).

Tabla 8. Clasificación de la textura en pavimentos para circulo de arena

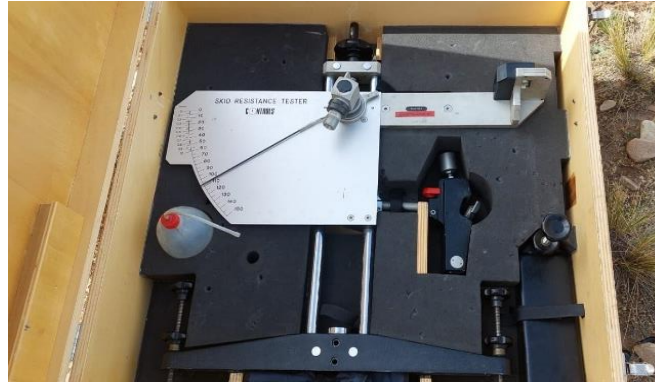
MTD	TEXTURA
< 0,20	Muy fina
0,21 - 0,40	Fina
0,41 - 0,80	Media
0,81 - 1,20	Gruesa
> 1,20	Muy gruesa

Fuente: Leiva, F. (2005). "Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos"

2.3.1.3.3. Microtextura con ensayo del péndulo británico (TRRL)

El ensayo consiste en la medición de la pérdida de energía de un péndulo provisto en su extremo de una zapata de caucho cuando esta última roza la superficie del pavimento a ensayar, la cual ha sido previamente humedecida. Dicha pérdida de energía se mide por el Angulo suplementario de la oscilación del péndulo. El ensayo puede ser ejecutado en campo (pavimento) o en laboratorio, en caso de disponer de muestras preparadas para estudiarlas con ensayos complementarios como por ejemplo el ensayo con rueda para medición de pulimiento acelerado (Corros B., Urbaez P., & Corredor M., 2009).

Gráfico 5. Péndulo británico



Fuente: Elaboración Propia

Procedimiento de campo del péndulo británico

- Armado del equipo péndulo británico.
- La superficie de ensayo en el campo debe estar libre de partículas sueltas y se limpiara con un chorro de agua a presión.
- Se debe registrar la temperatura en cada ensayo, las condiciones de temperatura deben encontrarse en un rango de 5°C a 40°C.
- Con el péndulo colgando libremente se bajará el mismo hasta que el borde de la zapata toque justamente el área a medir, determinada por el espaciador, se asegura la cabeza del péndulo, se levanta la palanca de elevación y se remueve el espaciador.
- Se debe aplicar simiente agua para cubrir el área totalmente. se realizan varios movimientos oscilatorios hasta obtener resultados consistentes, pero no se registrarán las lecturas.
- Se vuelve a mojar la superficie de contacto y se realiza cuatro movimientos oscilatorios, remojando la zona de ensayo antes de cada uno y se registran los datos.

Metodología de Cálculo

Cálculo de FA

$$FA = \frac{1}{(1 - 0.00525) * (T - 20)}$$

Donde:

T=Temperatura °C

FA= Factor de ajuste de temperatura

Cálculo de BPNA

$$BPNA = T_{Prom.} * FA$$

Donde:

TProm. =Promedio de las lecturas

FA= Factor de ajuste de temperatura

BPNA= Numero de Péndulo Británico

Cálculo RD

$$RD = \frac{BPNA}{100}$$

Donde:

RD: Resistencia al deslizamiento (mm)

BPNA= Numero de Péndulo Británico

Tabla 9. Clasificación del péndulo británico

RD	CLASIFICACION
<0,5	Malo (Deslizamiento)
0,51-0,6	De regular a malo
0,61-0,8	Bueno
0,81-0,9	De bueno a regular
>0,91	Malo (Desgaste de neumáticos)

Fuente: Leiva, F. (2005). "Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos"

2.3.2. Evaluación Estructural de un pavimento flexible

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.

La deflexión en los pavimentos no es más que la respuesta de los mismos ante un estímulo, en general cargas impuestas por el tráfico. La deflexión en los pavimentos es la deformación vertical bajo el punto de aplicación de la carga. En definitiva, la deflexión es la integración matemática de las deformaciones verticales con la profundidad

2.3.2.1. Método de la Viga Benkelman

La viga benkelman es probablemente es la más popular y económica de medición de deflexiones superficiales del pavimento y el mismo permite medir el rebote de la deflexión estática de un pavimento asfáltico bajo la aplicación de la carga. Funciona según principios de palanca: los dos brazos de la viga rotan alrededor de un eje horizontal, de tal manera que cualquier movimiento del extremo de la viga en contacto con el pavimento, produce un movimiento proporcional en el extremo opuesto, el cual es registrado por un dial extensómetro.

La carga de medición es de 8200 toneladas y la proporciona un camión con eje trasero simple, llantas dobles y presión de inflado entre 80 y 90 psi.

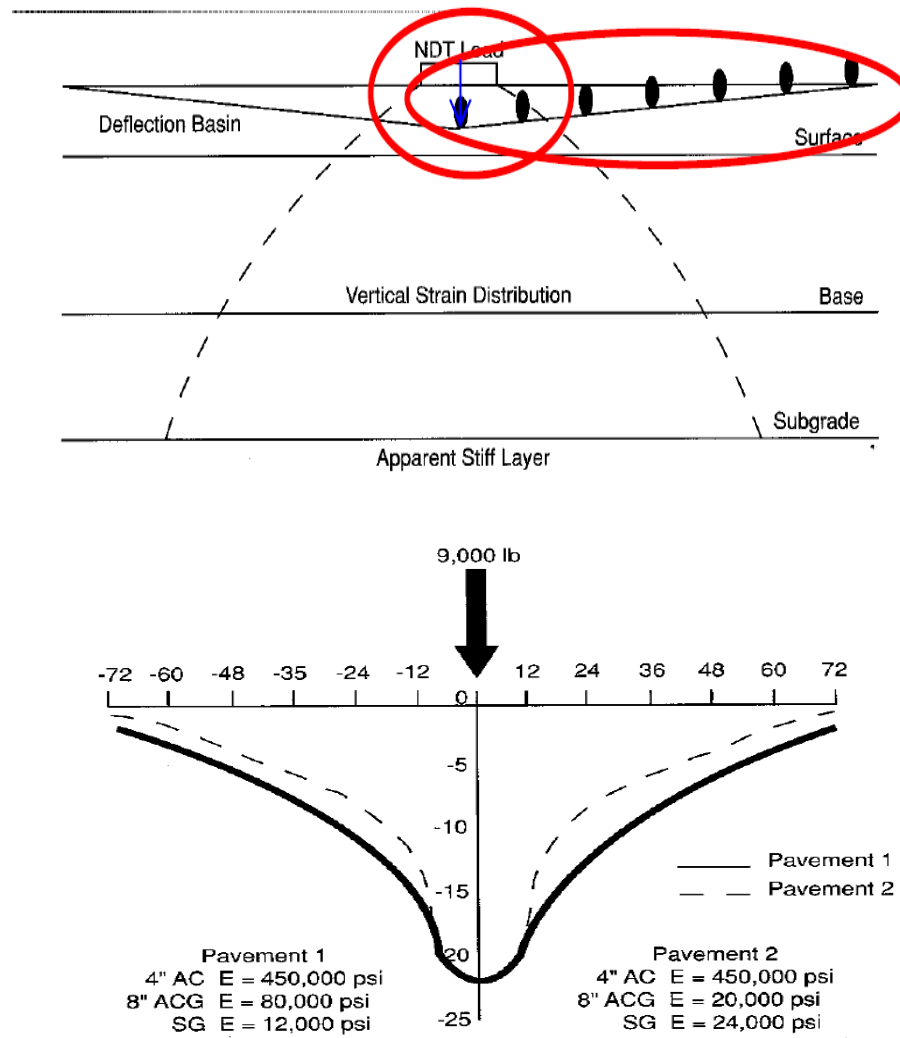
Gráfico 6. Componentes del equipo de viga benkelman



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

A continuación, se incluye un esquema del cuenco de deflexiones en un pavimento flexible debido a la aplicación de una carga:

Figura 31. Esquema del cuenco de deflexión de pavimento originado por la aplicación de una carga



Fuente: Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). “Manual de evaluación de pavimentos”. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

2.3.2.1.1. Descripción del equipo

El Deflectómetro Benkelman funciona según el principio de la palanca. Es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple, la viga consta esencialmente de dos partes:

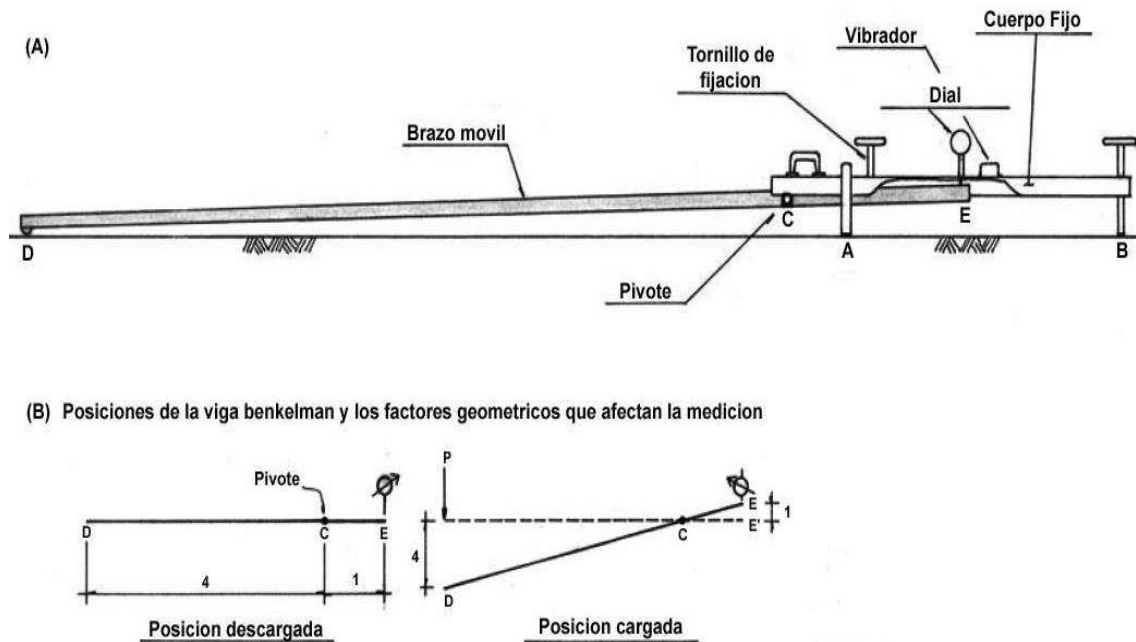
1. Un cuerpo de sostén que se sitúa directamente sobre el terreno mediante 3 apoyos (dos delanteros fijos “A” y uno trasero regulable “B”).
2. Un brazo móvil acoplado al cuerpo fijo mediante una articulación de giro o pivote C, uno de cuyos extremos se apoya sobre el terreno - punto D; y el otro se

encuentra en contacto sensible con el vástago del dial de movimiento vertical - punto E ($DC = 2,44\text{m}$, $CE = 0,61\text{ m}$). Adicionalmente el equipo posee un vibrador incorporado que al ser accionado, durante la realización de los ensayos, evita que el indicador del dial se trabe y/o que cualquier interferencia exterior afecte las lecturas.

El extremo D o punta de la viga es de espesor tal que puede ser colocado entre una de las llantas dobles del eje trasero del camión cargado. Por el peso aplicado se produce una deformación del pavimento, consecuencia de lo cual la punta baja una cierta cantidad, con respecto al nivel descargado de la superficie. Como efecto de dicha acción el brazo DE gira en torno al punto fijo C, con respecto al cuerpo AB, determinando que el extremo E produzca un movimiento vertical en el vástago, generando así una lectura en el dial. Si se retiran luego las llantas cargadas, el punto D se recupera en lo que a deformación elástica se refiere y por el mismo mecanismo anterior se genera otra lectura en el dial.

La operación expuesta representa el "principio de medición" con la Viga Benkelman. Lo que se hace después son sólo cálculos en base a los datos recogidos. Así, con las dos lecturas obtenidas es posible determinar cuánto deflectó 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 ésta. Para calcular la deflexión deberá considerarse la geometría de la viga, toda vez que los valores dados por el dial - EE' no están en escala real, sino que dependen de la relación de brazos existentes.

Figura 32. Esquema y principio de operación de la viga benkelman



Fuente: "Manual de ensayo de materiales". (2016). Perú: Ministerio de Transporte y comunicaciones.

Metodología para la medición de la deflexión con la viga Benkelman

1. Se realiza el pesaje del vehículo (volqueta) ya cargado, esta debe tener un peso en el eje trasero de 8,20 Ton (18000 lb) se acepta una variación en el orden de $\pm 1\%$.
2. Verificar que la presión de inflado en las llantas esté a 80 -90 psi.
3. Se posiciona el vehículo en el punto a ensayar, las ruedas gemelas deben estar situadas sobre la huella de circulación de los vehículos. Se centra el extremo delantero de la viga Benkelman en la proyección vertical del centro de gravedad del eje trasero de la volqueta, debe situarse en el medio del par de ruedas.
4. Se nivela la viga y se coloca el extensómetro y se pone en cero del mismo, esta posición se asumirá como la máxima deflexión y colocar la regla en la rasante haciendo coincidir el "0" con la proyección vertical del eje de la rueda trasera.
5. Ordenar el avance del camión a muy baja velocidad, la velocidad recomendada es de 1cm/seg. Apuntar las lecturas del dial en el estado inicial (deflexión máxima), a 0,50 metros y cuando el pavimento este totalmente libre de deflexión (por lo general >5 m).

6. Tomar la temperatura del pavimento y ambiente, antes de comenzar el ensayo y en el lugar donde se realizará el ensayo.

El rango de temperaturas de trabajo, en el que se pueden llevar a cabo las mediciones, queda en la siguiente forma:

Límite inferior: 5°C Límite superior: se considera lo siguiente.

Concreto asfáltico que presenta la superficie libre de deformaciones, sellados, u otros tratamientos superficiales: 30°C.

Mezclas de baja estabilidad o no convencionales, o concretos asfálticos no incluidos en el caso anterior: máxima temperatura para la cual no se detecta deformación plástica entre ambas cubiertas de la rueda dual, menor o igual a 30°C.

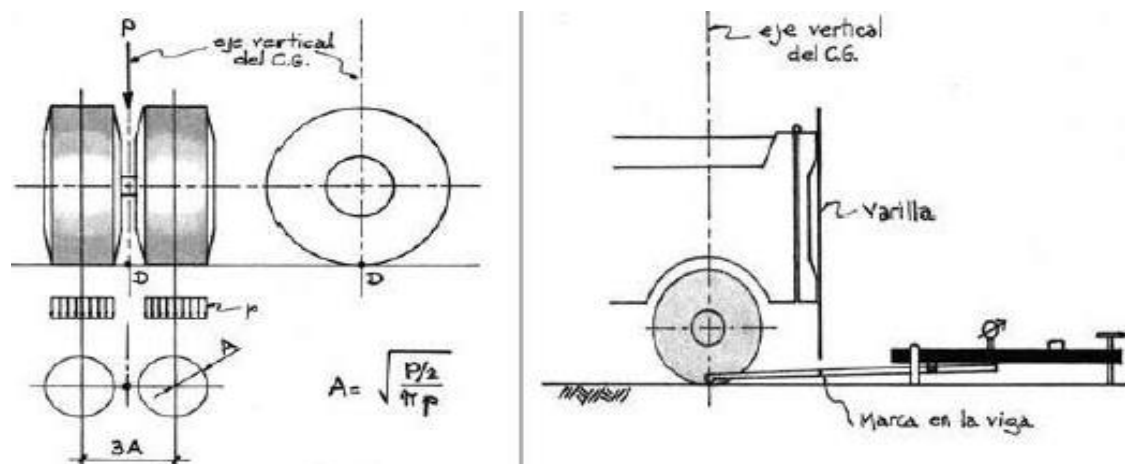
Repetir este procedimiento en cada uno de los puntos de ensayo. Se recomienda utilizar las distancias indicadas en la siguiente tabla:

Tabla 10. Recomendaciones del punto de ensayo sobre el pavimento

Ancho del carril (m)	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 mas	0.90 m

Fuente: "Manual de ensayo de materiales". (2016). Perú: Ministerio de Transporte y comunicaciones.

Figura 33. Esquema y principio de operación de la viga Benkelman



Fuente: Hoffman, & Águila, D. (1985). "Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones".

Metodología de cálculo para la viga benkelman

Cálculo de la deflexión máxima

$$D_o = K * (L_f - L_o)$$

Donde:

D_o= Deflexión máxima

K= Constante de la viga Benkelman (depende de la relación de brazos y de la calibración)

L_o= Lectura inicial

L_f= Lectura final

Deflexión media a la distancia:

$$D_{50} = K * (L_f - L_{50})$$

Donde:

D₅₀= Deflexión media a la distancia (deflexión a los 0,50 m)

K= Constante de la viga Benkelman (depende de la relación de brazos y de la calibración)

L₅₀= Lectura a 0,50 m de la posición inicial

L_f= Lectura final

Corrección por temperatura

El asfalto tiene un comportamiento visco – elástico, por tanto, las deflexiones son afectadas directamente por la temperatura (si el espesor es igual o superior a los 5cm), por lo tanto, deben estar corregidas en función a la temperatura media de la capa de rodadura durante la ejecución del ensayo, que varía a lo largo del día. Para llevar todas las mediciones a una temperatura estándar de 20 °C se emplea la ecuación siguiente:

$$D_{20} = \frac{D_o}{k * (T - 20^{\circ}\text{C}) * e + 1}$$

Donde:

D₂₀= Deflexión a la temperatura estándar (20°C)

D_t= Deflexión a la temperatura t

k= Coeficiente del asfalto medida para cada ensayo (1x10⁻³°C/cm)

e= Espesor de la carpeta asfáltica

Corrección por estacionalidad

La correcta medición de las deflexiones debería ser en épocas de lluvias, puesto que el grado de saturación de los suelos tiene influencia directa en la deformación de los suelos, si los ensayos se realizan en época seca, deben ser corregidos para simular tal condición. Para fines prácticos se recomienda el uso de los siguientes factores de corrección que dependen del tipo de suelo y época del año.

Tabla 11. Factor de corrección por estacionalidad

Tipo de suelo subrasante	Estación lluviosa	Estación seca
Arenosa - permeable	1	1.10 a 1.30
Arcillosa - sensible al agua	1	1.20 a 1.40

Fuente: Estudio CONREVIAL.

Cálculo del Radio de curvatura:

El método asume que la curvatura que experimenta la superficie del pavimento, durante la aplicación de la carga es de forma parabólica en un segmento de aproximadamente 0.50m a partir del punto de máxima deflexión.

$$R_c = \frac{6250}{k * (D_o - D_{50})}$$

Donde:

R_c= Radio de curvatura (m)

D_o= Deflexión máxima corregida

D₅₀= Deflexión a 0,50 m corregida

Deflexión admisible

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

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

Donde:

Da= Deflexión admisible (mm)

N18= Número total de ejes equivalentes a 8,2 Ton (18000 lb)

El pavimento sujeto a evaluación tendrá capacidad estructural suficiente para resistir las solicitaciones del tráfico de diseño, para las condiciones de resistencia de la subrasante, siempre que la deflexión máxima sea menor que la deflexión admisible.

$$D_o < D_{adm}$$

En el radio de curvatura, el pavimento sujeto a evaluación tendrá un comportamiento satisfactorio siempre que se cumpla que:

Los valores de radio de curvatura calculados son mayores a 100 m.

$$R_c > 100 \text{ m}$$

El radio de curvatura promedio está comprendido entre 300 – 500 m.

$$300 < R_c < 500$$

Deflexión media:

Gauss determina la deflexión media (Dm), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (Cv), para ello se usaron las siguientes expresiones donde “n” es el número de datos:

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - D_m)^2}{(n - 1)}}$$

$$C_v = \frac{\sigma}{D_m} * 100$$

Donde:

Dm= Deflexión media (0,01 mm)

Di= Deflexión recuperable máxima corregida (0,01 mm)

n= Numero de datos σ = Desviación estándar

Cv= Coeficiente de variación

Todos estos datos estadísticos sirven en diseño para determinar la deflexión característica

Deflexión característica

Es un valor que representa mejor a una determinada sección, siguiendo el criterio adoptado normalmente en análisis estadísticos, se establece como deflexión característica el valor:

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

Donde:

D_c = Deflexión característica

D_m = Deflexión promedio de los valores D_o

σ = Desviación estándar

t = Coeficiente porcentual del área con probabilidad de superar D_c

Considerando que cada deflexión media representa una cierta extensión o área del pavimento, cada valor de “ t ” corresponderá a un porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la característica D_c correspondiente. En este caso $t=1,645$ que es una probabilidad al 95%.

2.4. Conservación vial

Conjunto de acciones que se desarrollan para preservar a largo plazo la condición de los caminos y el servicio que prestan. Procura asegurar, al menor costo posible, el funcionamiento adecuado de un camino o red de caminos, permitiendo costos razonables de operación de los vehículos. Uno de los objetivos primordiales de la conservación es evitar, al máximo posible, la pérdida innecesaria de capital ya invertido, mediante la protección física de la estructura básica y de la superficie del camino. La conservación procura, específicamente, evitar la destrucción de elementos tales como obras de arte en general, túneles, drenajes, puentes, señalización, pavimento, y otros elementos que en conjunto conforman la infraestructura vial ("Manual de diseño de conservación vial", 2011).

El mantenimiento reduce la velocidad del deterioro del pavimento corrigiendo pequeños defectos antes de que ellos empeoren y conduzcan a deterioros mayores, Buscando recuperar el deterioro de la capa de rodadura ocasionados por el tránsito y por los efectos del clima. Más allá de cierto punto, el simple mantenimiento no es suficiente y se requieren

obras de rehabilitación que conducen a un mejoramiento en la condición del pavimento, recuperando las condiciones iniciales de la vía (Espinoza, 2006).

2.5. Tipos Mantenimiento vial

Una vez se ha superado la etapa de construcción de las vías, es necesario tomar medidas que ayuden a mantener un nivel adecuado de servicio. Con el paso del tiempo y a través de su uso, los pavimentos sufren todo tipo de esfuerzos y degradaciones naturales que llevan finalmente a la pérdida de servicio de estos. En este sentido, “un estado defectuoso de la carretera origina unos incrementos en los costos de operación de los vehículos, con aumentos en los tiempos de viaje y del coste de los accidentes producidos, de ahí la razón de mantener las vías en buenas condiciones.

Por lo anterior, la función principal del mantenimiento es lograr que los pavimentos puedan llegar a su vida útil, o incluso aumentarla, bajo las mejores y mayores condiciones de seguridad y movilidad para el usuario manteniendo estables los costos por operación de los vehículos. Históricamente desde la construcción de pavimentos se ha adoptado principalmente dos clases de mantenimiento: Mantenimiento rutinario y Mantenimiento periódico.

2.5.1. Mantenimiento rutinario

se realiza para mejorar la vida funcional de un pavimento, se trata de una serie de estrategias que reducen el deterioro progresivo del pavimento mediante tratamientos superficiales. Se puede decir que son las operaciones que lo ayudan a llegar a su vida útil dentro de los mejores niveles de servicio por lo que constituye un tratamiento preventivo. Se realiza de forma regular en el tiempo hasta donde sea posible. Son labores de bajo costo comparadas con otras de conservación de una vía, pero su importancia es vital para el desempeño del pavimento ya que reducen el deterioro progresivo.

La intervención oportuna de este mantenimiento es relevante ya que, de aplicar el procedimiento adecuado, en el momento adecuado, se pueden ahorrar gastos en intervenciones correctivas posteriores. Es la base para el buen funcionamiento financiero de las administraciones viales. Lo anterior siempre y cuando se tenga establecido un programa correcto de gestión de infraestructura vial enfocado hacia las intervenciones de conservación (Espinoza, 2006).

2.5.2. Mantenimiento periódico

Se define como las prácticas tendientes a aumentar la vida residual estructural del pavimento. Corrigiendo de forma definitiva defectos superficiales importantes a corto plazo. Se realizan de forma periódica, planteando una programación de intervención de acuerdo al comportamiento esperado del pavimento. Generalmente se realizan en períodos superiores a un año. Estos tratamientos no incluyen la intervención a las capas granulares de la estructura del pavimento, tan solo a niveles de capas asfálticas superficiales, es decir se requiere que la estructura del pavimento tenga la suficiente capacidad de soporte para los tratamientos a implementar. Por lo anterior se convierten en estrategias preventivas o correctivas (Espinoza, 2006).

Las actividades de mantenimiento se agrupan en dos categorías, las cuales son: preventivas y correctivas. El mantenimiento preventivo incluye aquellas actividades realizadas para proteger el pavimento y reducir su tasa de deterioro. Por su parte el mantenimiento correctivo consiste en aquellas actividades ejecutadas para corregir fallas específicas del pavimento o áreas deterioradas. A continuación, se presentan la tabla donde se relacionan los rangos de PCI de un pavimento flexible a la categoría de acción a utilizar.

Tabla 12. Correlación de categoría de acción con el rango de PCI

Rango de PCI	Categoría de acción
100 a 85	Mantenimiento preventivo o mínimo
85 a 60	Mantenimiento preventivo rutinario y/o periódico
60 a 40	Mantenimiento correctivo
40 a 25	Rehabilitación - refuerzo estructural
Menor a 25	Rehabilitación – reconstrucción

Fuente: Manual de diseño de conservación vial" (Vol. V). (2011). Administradora Boliviana de Carreteras.

El mantenimiento preventivo se puede clasificar en rutinario y periódico. El rutinario Se ejecuta con regularidad, una o más veces al año, dependiendo de la condición del camino y el periódico se realiza cada cierto número de años.

2.6. Marco Normativo

PCI (Índice de condición del pavimento)

Basado en la Norma ASTM D6433-03, la cual considera muestras de 230 m² de área como valor máximo de una superficie de muestra. Para poder determinar la clasificación se debe seguir una serie de pasos señalados por la norma y registrar de una manera ordenada la información del inventario vial tal como tipo de daño, severidad y la cuantificación de las mismas de acuerdo a una unidad de muestreo.

IRI (Índice de Regularidad Internacional)

Basado en la especificación ASTM E867 “terminology Relating to traveled Surface characteristics”, define la rugosidad como la desviación de una determinada superficie de pavimento respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica

El equipo rugosímetro de merlín el cual se usa en este proyecto denominado por la abreviatura “Machine for Evaluating Roughness using low cost instrumentation”, este consiste en una estructura metálica de 1,8 m de longitud, con una rueda en frente, un pie de apoyo fijo atrás y un apoyo central oscilante. Este último mide las desviaciones de cota de un punto respecto en la rasante que definen los otros dos puntos. El apoyo central unido al brazo que en su extremo superior posee un puntero permite registrar dichas desviaciones en una planilla.

IFI (Índice de Fricción Internacional)

El método del círculo de arena. (Norma ASTM E 965) sirve para determinar las medidas puntuales de la macrotextura, Consiste en extender en forma circular sobre la superficie del pavimento un volumen conocido (25cm³) de arena fina de granulometría uniforme cubriendo todas las irregularidades de la superficie quedando enrasada la arena con los “picos” o “proyecciones” de la superficie.

El método del péndulo de fricción (ASTM E 303) es una indicación directa del grado de rugosidad que proporciona la micro textura del pavimento.

El ensayo consiste en la medición de la pérdida de energía de un péndulo provisto en su extremo de una zapata de caucho cuando esta última roza la superficie del pavimento a

ensayar, la cual ha sido previamente humedecida. Dicha pérdida de energía se mide por el Angulo suplementario de la oscilación del péndulo.

Viga Benkelman

Para la evaluación estructural se utilizará el método de la Viga Benkelman basada en la norma ASTM D-4695, Permite medir el rebote de la deflexión estática de un pavimento asfáltico bajo la aplicación de la carga. Funciona según principios de palanca: los dos brazos de la viga rotan alrededor de un eje horizontal, de tal manera que cualquier movimiento del extremo de la viga en contacto con el pavimento, produce un movimiento proporcional en el extremo opuesto, el cual es registrado por un dial extensómetro. La carga de medición es de 8200 toneladas y la proporciona un camión con eje trasero simple, llantas dobles y presión de inflado entre 80 y 90 psi.

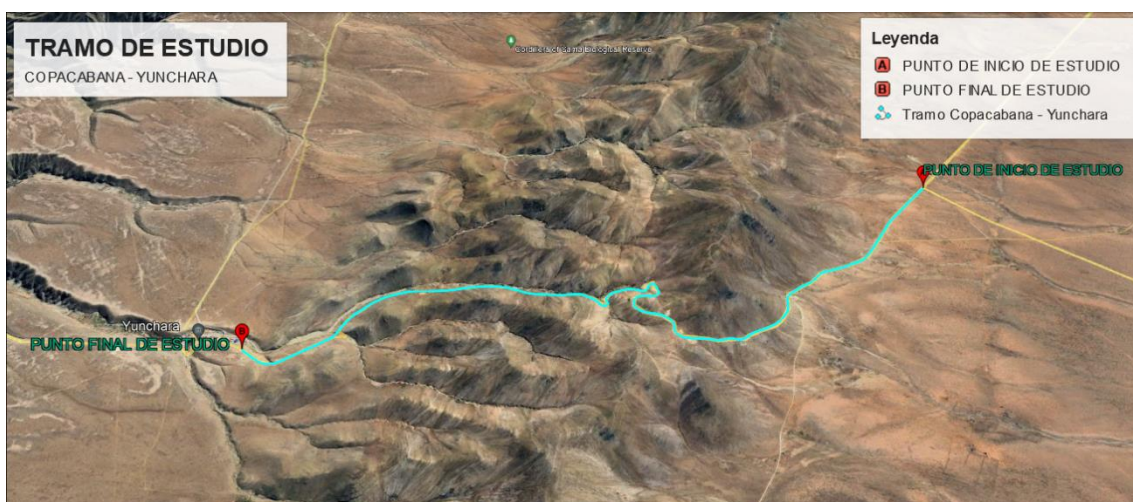
CAPÍTULO III

CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO

COPACABANA – YUNCHARÁ Y CRITERIOS DE

RELEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

Gráfico 8. Ubicación del tramo vial Copacabana - Yunchará



Fuente: Google Earth

El tramo se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas geográficas

Tabla 13. Puntos de estudio

PUNTOS DE ESTUDIO	COORDENADAS UTM	
	COORDENADA ESTE	COORDENADA NORTE
INICIO	277719.10 N	7587920.01 E
FINAL	270224.20 N	7584817.30 E

Fuente: Elaboración Propia.

3.2. Relevamiento de información.

El tramo Copacabana – Yunchará es inaugurado el año 2016 se encuentra en la ruta D-611 de la red departamental de carreteras de Tarija. según el SEDECA (Servicio Departamental de Caminos) se tiene la siguiente información y descripción técnica del tramo vial.

Paquete estructural

En la siguiente tabla se muestra el paquete estructural que presenta el tramo Copacabana – Yunchará.

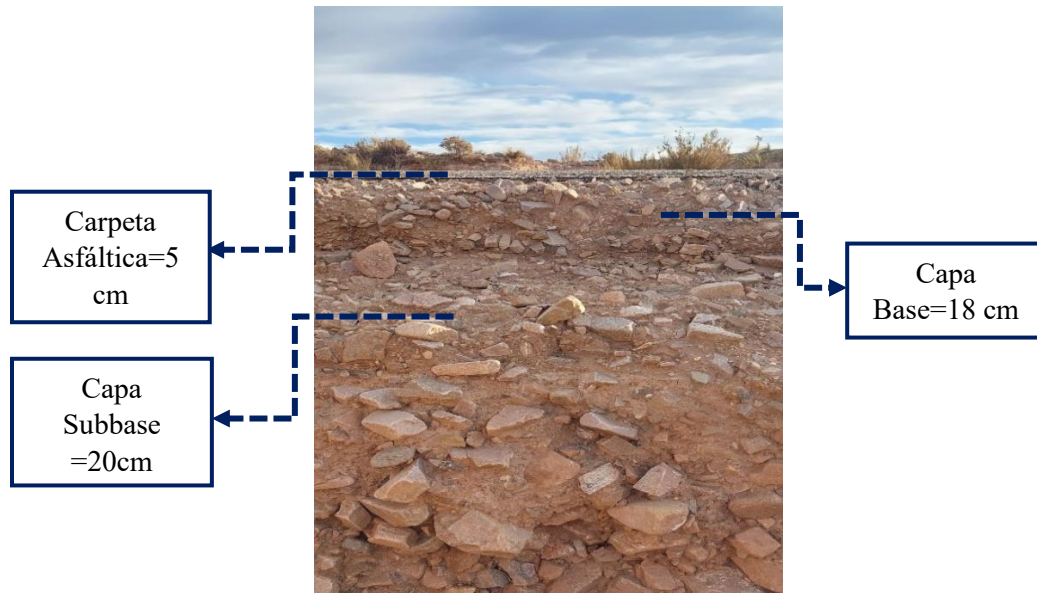
Tabla 14. Descripción del paquete estructural

Tramo	Espesor de la capa de rodadura	Espesor de la capa base	Espesor de la capa sub base
Copacabana - Yunchará	5 cm	18 cm	20 cm

Fuente: SEDECA (Servicio Departamental de Caminos)

Para verificar la información del paquete estructural se procedió en campo realizar la medición de los espesores tanto de carpeta asfáltica, capa base y capa subbase, el cual cumplen los espesores con la información brindada por el SEDECA (Servicio Departamental de Caminos) del tramo vial Copacabana – Yunchará.

Gráfico 9. Espesor del paquete estructural



Fuente: Elaboración Propia.

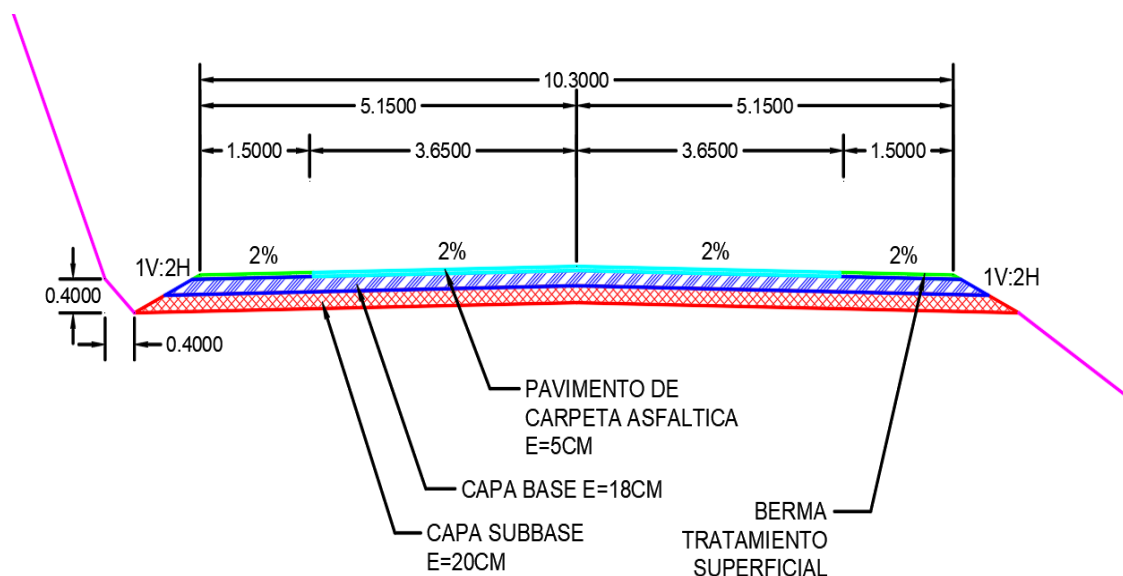
Diseño geométrico

Tabla 15. Diseño geométrico del tramo vial Copacabana - Yunchará

DISEÑO GEOMETRICO	
Longitud total	11.00 Km
Topografía	Ondulada
Pendiente máxima	8,00%
Velocidad directriz	60,00 km/hr
Radio de curvatura mínimo	80,00 m
Peralte máximo	8,00%
Bombeo	2,00%
Ancho de carril	3,65 m
Ancho de calzada	7,30 m
Ancho de bermas	1,50 m
Ancho de plataforma	10,30 m

Fuente: SEDECA (Servicio Departamental de Caminos)

Gráfico 10. Diseño geométrico del tramo vial Copacabana - Yunchará



Fuente: SEDECA (Servicio Departamental de Caminos)

3.3. Evaluación superficial

Para la evaluación superficial del tramo “Copacabana – Yunchará” se utilizó la metodología del PCI (índice de condición de pavimento), este método nos permite conocer las fallas que presenta la superficie del tramo, al ser un método muy moroso y que requiere de mucho tiempo para realizar, como la norma indica se puede realizar un tamaño de muestra seleccionando una cierta cantidad de unidades de muestreo con una confiabilidad del 95% y un margen de error admisible de 5 %, IRI (índice internacional de rugosidad) e IFI (índice de fricción interna).

3.3.1. Determinación del PCI (Índice de Condición de Pavimento)

Se detallará la metodología aplicada para la evaluación superficial del tramo “Copacabana Yunchará” siguiendo los lineamientos definidos por el método PCI. El método permitirá conocer el estado de la superficie del tramo, este método llega a ser moroso y requiere mucho tiempo para realizarlo, la bibliografía menciona que solamente se seleccione una cierta cantidad de unidades de muestreo del tramo, por lo que el trabajo se minimiza y los resultados son confiables.

➤ **Muestreo y unidades de muestra**

Mediante la norma se divide la vía en secciones “unidades de muestreo”, carreteras con capa rodadura asfáltica y un ancho menor que 7.30 m, el área de la unidad de muestreo debe estar en el rango de $230 \pm 93 \text{ m}^2$, se observa en la tabla que presenta las relaciones de longitud – ancho de calzada.

Tabla 16. Longitudes de unidades de muestreo asfálticas.

Ancho de calzada (m)	Longitud de la unidad de muestra (m)
5.0	46.0
5.5	41.8
6.0	38.3
6.5	35.4
7.3 (Máximo)	31.5

Fuente: Manual del PCI “norma ASTM D6433 -03”

Figura 34. Determinación de la longitud de la calzada, para determinación del PCI



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 35. Punto de partida para evaluación superficial y estructural del tramo "copacabana - Yunchará"



Fuente: Elaboración Propia.

El ancho de la calzada del tramo “Copacabana - Yunchará” es de 7.30 m, según la tabla anterior se optó por tomar una longitud de muestra de 32 m. para cada una de las áreas llegando a ser la unidad de muestra de 234 m² está dentro del rango establecido por el método.

Se realizó un pre visualización inicial de la vía para tener criterio de división de tramos. Para tener una mejor precisión de la evaluación superficial por el método PCI, se realizó una división de todo el tramo en secciones de 4 km y uno de 3 km así completar los 11 km de estudio, para obtener así el PCI por kilómetro de vía. Este tipo de análisis es ideal para una mejor estimación del mantenimiento y reparaciones necesarias por kilómetro de carretera.

Como datos para obtener el número mínimo de unidades de muestra se tiene:

Para progresivas de 0+000 a 8+000 en dos secciones de 4 km.

Ancho de vía = 7.30 m

Longitud de muestreo = 32 m

Longitud de sección = 4000 m

$$N = \frac{\text{longitud de seccion}}{\text{longitud de muestreo}}$$

$$N = \frac{4000 \text{ m}}{32 \text{ m}} = 125$$

Hay 125 unidades de muestra tiene un área de 234 m² que están dentro del rango en el PCI.

$$n = \frac{N * \sigma^2}{\left(\frac{e^2}{4}\right) * (N - 1) + \sigma^2}$$

Donde:

n= Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar.

N= Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento (N=125)

e= Error admisible en el estimativo del PCI de la sección (e =5)

σ= Desviación estándar del PCI entre las unidades. (= 10)

Por lo tanto, el número de unidades de muestra que se tendrá para la evaluación es el siguiente:

$$n = \frac{125 * 10^2}{\left(\frac{5^2}{4}\right) * (125 - 1) + 10^2}$$

$$n = 14 \text{ unidades de muestreo}$$

Para las presente secciones se calcula el intervalo de muestreo como se muestra a continuación:

$$i = \frac{N}{n} = \frac{125}{14} = 8$$

Con el intervalo de (i) igual a 8 se procede a identificar la unidad de manera inicial para cada sección de tramo.

Tabla 17. Sección 1 de progresiva 0+000 a 4+000

Sección 1		
Prog. Inicial	Prog. Final	Unidad de muestra
0+000	0+032	U1
0+288	0+320	U10
0+576	0+608	U19
0+864	0+896	U28
1+152	1+184	U37
1+440	1+472	U46
1+728	1+760	U55
2+016	2+048	U64
2+304	2+336	U73
2+592	2+624	U82
2+880	2+912	U91
3+168	3+200	U100
3+456	3+488	U109
3+744	3+776	U118

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18. Sección 2 de progresiva 4+000 a 8+000

Sección 2		
Prog. Inicial	Prog. Final	Unidad de muestra
4+032	4+064	U1
4+320	4+352	U10
4+608	4+640	U19
4+896	4+928	U28
5+184	5+216	U37
5+472	5+504	U46
5+760	5+792	U55
6+048	6+080	U64
6+336	6+368	U73
6+624	6+656	U82
6+912	6+944	U91
7+200	7+232	U100
7+488	7+520	U109
7+776	7+808	U118

Fuente: Elaboración Propia

Para progresivas de 8+000 a 11+000 en una sección de 3 km.

Ancho de vía = 7.30 m

Longitud de muestreo = 32 m

Longitud de sección = 3000 m

$$N = \frac{\text{longitud de seccion}}{\text{longitud de muestreo}}$$

$$N = \frac{3000 \text{ m}}{32 \text{ m}} = 94$$

Hay 94 unidades de muestra tiene un área de 234 m² que están dentro del rango en el PCI.

$$n = \frac{N * \sigma^2}{\left(\frac{e^2}{4}\right) * (N - 1) + \sigma^2}$$

Donde:

n= Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar.

N= Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento (N=94)

e= Error admisible en el estimativo del PCI de la sección (e =5)

σ = Desviación estándar del PCI entre las unidades. (= 10)

Por lo tanto, el número de unidades de muestra que se tendrá para la evaluación es el siguiente:

$$n = \frac{94 * 10^2}{\left(\frac{5^2}{4}\right) * (94 - 1) + 10^2}$$

$$n = 14 \text{ unidades de muestreo}$$

Para la presente sección se calcula el intervalo de muestreo como se muestra a continuación:

$$i = \frac{N}{n} = \frac{94}{14} = 6$$

Con el intervalo de (i) igual a 6 se procede a identificar la unidad de manera inicial para cada sección de tramo.

Tabla 19. Sección 3 de progresiva 8+000 a 11+000

Sección 3		
Prog. Inicial	Prog. Final	Unidad de muestra
8+000	8+032	U1
8+224	8+256	U8
8+448	8+480	U15
8+672	8+704	U22
8+896	8+928	U29
9+120	9+152	U36
9+344	9+376	U43
9+568	9+600	U50
9+792	9+824	U57
10+016	10+048	U64
10+240	10+272	U71
10+464	10+496	U78
10+688	10+720	U85
10+912	10+944	U92

Fuente: Elaboración Propia

Procedimiento del índice de condición de pavimento (PCI)

Una vez determinada la unidad de muestra se inspecciona minuciosamente el área o unidad de falla registrando el tipo de falla, cantidad y severidad de acuerdo al manual del PCI.

Figura 36. Medición e identificación de las fallas superficiales



Fuente: Elaboración Propia

Los datos levantados de cada área de unidad de muestreo se debe registrar el tipo de falla, su extensión y severidad en la planilla de campo. Se muestra la planilla de levantamiento de datos en un área específica.

Figura 37. Unidad de muestra inicial 0+000 a 0+032



Fuente: Elaboración Propia

Procedimiento de calculo

Para el cálculo de PCI, primeramente, se debe calcular el total de cada una de las fallas y su severidad los daños pueden ser medidos en área o longitud según el tipo de falla.

Para la obtención de la densidad de debe dividir cada una de las fallas en cada nivel de severidad entre el área de la unidad de muestreo, la densidad se expresa en porcentaje, como ejemplo se tomará la unidad de muestra U64 de la sección 1.

Tabla 20. Inventario de fallas existentes unidad de muestra U64 sección 1.

INVENTARIO DE FALLAS EXISTENTES						
Falla	Unidad	Severidad	Largo (m)	Ancho (m)	Prof. (m)	Total
Exudación	m ²	L	0,9	32		28,8
Abultamientos y Hundimientos	m ²	L	0,2	32		6,4
Fisuras long. y/o transv.	M	L	5			5
Meteorización /Desprendimiento de Agregados	m ²	L	1	5		5
Meteorización /Desprendimiento de Agregados	m ²	L	1,2	8		9,6
Meteorización /Desprendimiento de Agregados	m ²	L	2,2	7		15,4
Meteorización /Desprendimiento de Agregados	m ²	L	1,2	8		9,6

Fuente: Elaboración Propia

Para la falla meteorización /desprendimiento de agregados teniendo un área total=39.6 m²

$$Densidad = \frac{\text{área total dañada (tipo y severidad)}}{\text{area de l unidad de muestreo}} * 100$$

$$Densidad = \frac{39.6 \text{ m}^2}{234 \text{ m}^2} * 100$$

$$Densidad = 16.95 \%$$

Para determinar el valor deducido (DV) para cada combinación de tipo de falla y nivel de severidad utilizando los ábacos de valor deducido de fallas normadas.

VALORES DEDUCIDOS DE FALLAS EXISTENTES					
Falla	Unidad	Severidad	Total	Densidad %	VD
Exudación (L)	m ²	L	28,8	12,33	3
Abultamientos y Hundimientos (L)	m ²	L	6,4	2,74	8
Fisuras long. y/o transv. (L)	m	L	5	15,63	10
Meteorización /Desprendimiento de Agregados (L)	m ²	L	39,6	16,95	7
					m = 9,27
					q = 4

Posterior se crea una lista de valores deducidos individuales en orden descendente del ejemplo será, 10, 8, 7 y 3.

Determinando el número de deducciones permisibles “m”

$$m = 1 + \left(\frac{9}{98}\right) * (100 - HDV)$$

Donde:

m= número máximo admisible de valores deducidos incluyendo fracciones (debe ser menor o igual a diez)

HDV= el mayor valor deducido individual para la unidad de muestra. (del ejemplo =10)

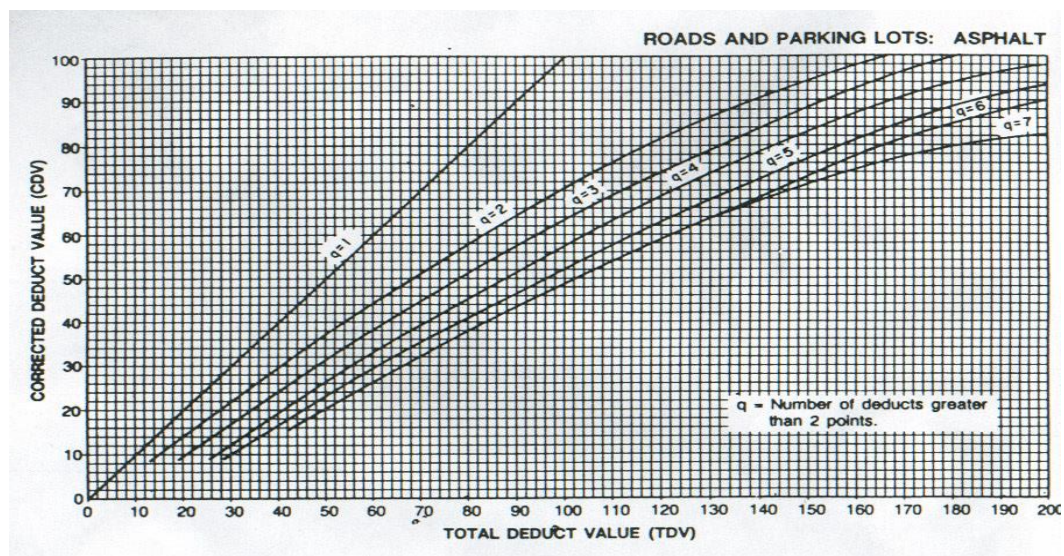
$$m = 1 + \left(\frac{9}{98}\right) * (100 - 10) = 9.27$$

El número de valores deducidos individuales es reducido al máximo admisible de valores deducidos “m”, incluyendo su parte fraccionaria. Si contamos con un numero de valores deducidos menor a “m”, todos los valores deducidos deben ser usados.

Para determinar “q” el número de valor deducidos mayores a 2. Del ejemplo es q=4

Para el cálculo del máximo valor deducido corregido (CDV), deducir a 2 el menor valor deducido individual mayor que 2 y repetir el procedimiento.

Figura 38. Curva de los valores deducidos corregidos



Fuente: Manual del PCI “norma ASTM D6433 -03”

Tabla 21. Obtención de valores deducidos

VALORES DEDUCIDOS							CDT	Q	CDV
10	8	7	3				28	4	10
10	8	7	2				27	3	14
10	8	2	2				22	2	15
10	2	2	2				16	1	16

Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se determina el valor deducido máximo (HDV) de los valores deducidos individuales del ejemplo es 16.

Y finalmente se calcula el PCI para esta determinada unidad de muestra

$$PCI = 100 - HDV$$

$$PCI = 100 - 16$$

$$PCI = 84$$

Para su clasificación del PCI se verifica con la tabla.

Tabla 22. Rangos de clasificación y simbología PCI

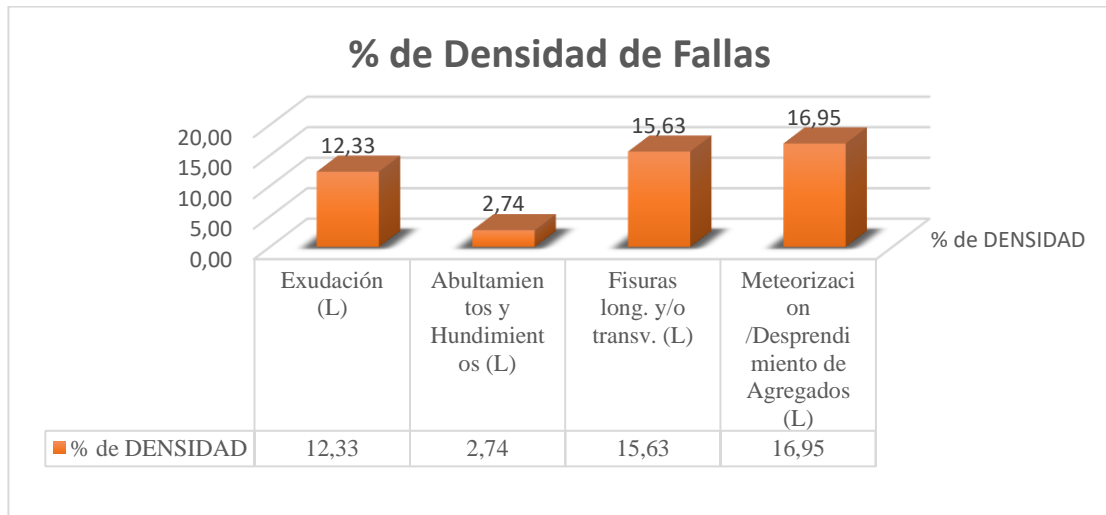
Rango	Clasificación	Simbología
100-85	Excelente	
85-70	Muy bueno	
70-55	Bueno	
55-40	Regular	
40-25	Malo	
25-10	Muy malo	
10-0	Fallado	

Fuente: Manual del PCI “norma ASTM D6433 -03”

Obteniendo un resultado parcial de la unidad de muestra de:

HDV	16
PCI	84
CLASIFICACIÓN	MUY BUENO

Gráfico 11. Densidad de las fallas para determinada área de estudio



Fuente: Elaboración Propia

Se realiza el mismo procedimiento para cada unidad de muestra, el tipo de falla existente y para las demás secciones. Los detalles de las demás unidades de muestra se incluyen en el anexo 1.

➤ **Resultados del PCI por sección**

Tabla 23. Resultados y clasificación del PCI sección 1

Sección 1				
Prog. Inicial	Prog. Final	Unidad de muestra	Valor del PCI	Calificación
0+000	0+032	U1	82	MUY BUENO
0+288	0+320	U10	72	MUY BUENO
0+576	0+608	U19	67	BUENO
0+864	0+896	U28	84	MUY BUENO
1+152	1+184	U37	88	EXCELENTE
1+440	1+472	U46	81	MUY BUENO
1+728	1+760	U55	85	MUY BUENO
2+016	2+048	U64	84	MUY BUENO
2+304	2+336	U73	73	MUY BUENO
2+592	2+624	U82	83	MUY BUENO
2+880	2+912	U91	75	MUY BUENO
3+168	3+200	U100	94	EXCELENTE
3+456	3+488	U109	82	MUY BUENO
3+744	3+776	U118	61	BUENO

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24. Resultados y clasificación del PCI sección 2

Sección 2				
Prog. Inicial	Prog. Final	Unidad de muestra	Valor del PCI	Calificación
4+032	4+064	U1	86	EXCELENTE
4+320	4+352	U10	88	EXCELENTE
4+608	4+640	U19	76	MUY BUENO
4+896	4+928	U28	57	BUENO
5+184	5+216	U37	97	EXCELENTE
5+472	5+504	U46	44	REGULAR
5+760	5+792	U55	78	MUY BUENO
6+048	6+080	U64	78	MUY BUENO
6+336	6+368	U73	92	EXCELENTE
6+624	6+656	U82	87	EXCELENTE
6+912	6+944	U91	81	MUY BUENO
7+200	7+232	U100	97	EXCELENTE
7+488	7+520	U109	92	EXCELENTE
7+776	7+808	U118	96	EXCELENTE

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 25. Resultados y clasificación del PCI sección 3

Sección 3				
Prog. Inicial	Prog. Final	Unidad de muestra	Valor del PCI	Calificación
8+000	8+032	U1	72	MUY BUENO
8+224	8+256	U8	94	EXCELENTE
8+448	8+480	U15	94	EXCELENTE
8+672	8+704	U22	92	EXCELENTE
8+896	8+928	U29	91	EXCELENTE
9+120	9+152	U36	98	EXCELENTE
9+344	9+376	U43	98	EXCELENTE
9+568	9+600	U50	95	EXCELENTE
9+792	9+824	U57	94	EXCELENTE
10+016	10+048	U64	100	EXCELENTE
10+240	10+272	U71	84	MUY BUENO
10+464	10+496	U78	77	MUY BUENO
10+688	10+720	U85	94	EXCELENTE
10+912	10+944	U92	64	BUENO

Fuente: Elaboración Propia.

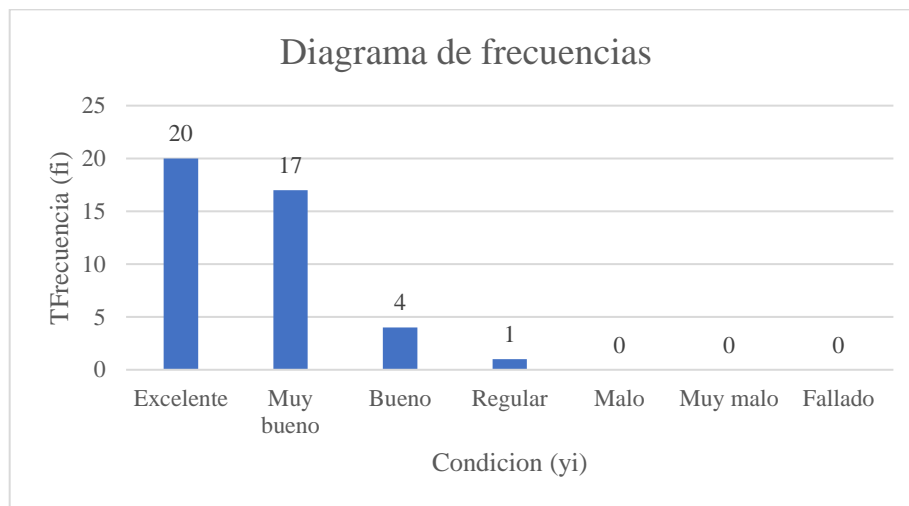
Tratamiento estadístico

Tabla 26. Tratamiento estadístico del PCI.

n	Condición (y _i)	Frecuencia (f _i)	Frecuencia relativa (h _i)		
			Fracción	Decimal	Porcentual (%)
1	Excelente	20	20/42	0,48	48
2	Muy bueno	17	17/42	0,40	40
3	Bueno	4	4/42	0,10	10
4	Regular	1	1/42	0,02	2
5	Malo	0	0/42	0,00	0
6	Muy malo	0	0/42	0,00	0
7	Fallado	0	0/42	0,00	0
	Σ	42	11/11	1	100

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 12. Diagrama de frecuencias del PCI



Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que gracias al tratamiento estadístico que la mayoría de la cantidad de muestras se encuentra en una condición excelente, muy buena, bueno y regular. lo cual nos indica que según el método PCI la vía se encuentra en condiciones aptas para los usuarios.

3.3.2. Determinación del IRI (Índice de Regularidad Internacional)

Método dispositivo basado en el equipo de Merlín

Para la ejecución de los ensayos se requiere de tres personas para el trabajo conjunto, un operador que conduce el equipo y realizó las lecturas, un auxiliar que las anota y un personal de seguridad.

El ensayo se realizó a los 400 m iniciales de cada kilómetro en el carril de ida y vuelta.

Procedimiento de ensayo

Se debe seleccionarse una distancia de aproximadamente 400 m de longitud, sobre el carril de la carretera. Las mediciones se efectúan siguiendo la huella exterior del tráfico.

Figura 39. Lectura y toma de datos del ensayo con el rugosímetro de Merlín



Fuente: Elaboración Propia

Para determinar un valor de rugosidad y deben efectuar 200 observaciones de las “irregularidades que presenta el pavimento” cada una de las cuales son detectadas por el patín móvil del Merlín, y que a su vez son indicadas por la posición que adopta el puntero sobre la escala graduada del tablero, generándose de esa manera las lecturas.

Las observaciones deben realizarse estacionando el equipo a intervalos regulares, generalmente cada 2 m de distancia; en la práctica esto se resuelve tomando como referencia la circunferencia de la rueda del Merlín, que es aproximadamente esa dimensión, es decir, cada ensayo se realiza al cabo de una vuelta de la rueda.

Figura 40. Lectura de datos carril Ida a una distancia constante



Fuente: Elaboración Propia

En cada observación el instrumento debe descansar sobre el camino apoyando en tres puntos fijos e invariables: la rueda, el apoyo fijo trasero y el estabilizador para el ensayo.

La posición que adopta el puntero corresponde a una lectura entre 1 a 50, la que se anotara en un formato de campo. El formato consta de una cuadrícula compuesta por 20 filas y 10 columnas; empezando por el casillero (1), los datos se llenan de arriba hacia abajo e izquierda a derecha.

La prueba empieza estacionando el equipo al inicio del tramo de ensayo, el operador espera que el puntero se estabilice y observe la posición que adopta respecto de la escala colocando sobre el tablero, realizando a si la lectura que es anotado por el auxiliar.

Procedimiento de calculo

Como ejemplo se tomará la progresiva 2+000 a 2+400 (ida)

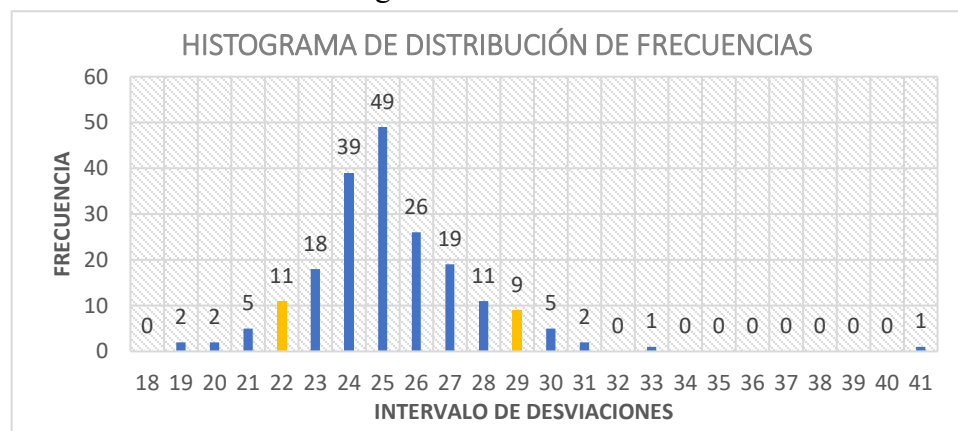
Tabla 27. Datos de campo levantados con la rueda de Merlín

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	25	22	24	20	27	25	41	24	26	22
2	24	27	25	21	26	24	23	25	26	28
3	31	24	27	23	25	25	26	25	25	25
4	23	24	29	24	26	26	27	23	25	29
5	33	22	25	28	26	27	23	24	25	22
6	25	24	25	28	24	25	27	26	29	27
7	28	27	22	24	27	25	24	25	25	28
8	26	23	24	24	24	25	22	25	22	23
9	24	29	23	24	26	22	24	24	25	27
10	26	26	27	25	26	24	25	25	25	20
11	25	24	23	25	24	22	27	24	25	25
12	24	21	25	24	28	25	29	24	26	25
13	26	30	29	26	30	24	25	25	24	27
14	25	30	22	25	29	26	24	27	25	26
15	22	21	24	26	27	25	24	24	25	28
16	23	28	25	25	26	25	23	28	25	21
17	26	26	27	26	25	25	25	29	23	30
18	28	25	24	23	24	27	19	23	21	24
19	27	26	26	23	31	29	25	27	25	28
20	23	23	24	24	30	19	23	24	26	24

Fuente: Elaboración Propia

Con los datos obtenidos se determina el histograma donde la frecuencia refleja el número de veces que se repite la misma lectura como se muestra en el grafico siguiente:

Gráfico 13. Histograma de distribución de frecuencias



Fuente: Elaboración Propia

Se depura el 5 % de cada lado de los datos de distribución de frecuencias siendo un total de 10% de los datos, para lo cual se realiza la siguiente tabla de frecuencias para la depuración de datos.

Tabla 28. Frecuencias obtenidas del histograma

FRECUENCIAS	
Valor a dividir izq. (di) =	11
Existente izq. (ei) =	9
Faltante izq. (fi) =	1
Valor a dividir der.(dd) =	9
Existente der. (ed) =	9
Faltante der. (fd) =	1
rango medio (dm) =	6

Fuente: Elaboración Propia

Cálculo del rango D:

$$D = \left(\frac{(d_i - f_i)}{d_i} + d_m + \frac{(d_d - f_d)}{d_d} \right) * 5 [mm]$$

$$D = \left(\frac{(11 - 1)}{11} + 6 + \frac{(9 - 1)}{9} \right) * 5 [mm]$$

$$D = 38,99 \text{ mm}$$

Cálculo de factor de corrección fc:

$$f_c = \left(\frac{(E_p * 10)}{(L_i - L_f) * 5} \right)$$

Donde:

Ep =6,2

Li=25

Lf=10

$$f_c = \left(\frac{(6,2 * 10)}{(25 - 10) * 5} \right) = 0,827 \text{ mm}$$

Cálculo del rango corregido Dc:

$$D_c = D * f_c$$

$$D_c = 38,99 * 0,827 = 32,23 \text{ mm}$$

Determinación el IRI:

1. Aplicando fórmula para pavimentos nuevos o en buen funcionamiento

$$I.R.I. = 0,0485 * D_c$$

$$I.R.I. = 0,0485 * 32,23$$

$$I.R.I. = 1,56 \frac{m}{Km}$$

Resultados IRI carril ida y vuelta del tramo en estudio

Tabla 29. Resultados Ida y Vuelta IRI por progresivas

PROGRESIVAS		IRI (m/Km)	
Prog. inicial	Prog. final	Ida	Vuelta
0+000	1+000	1,18	1,34
1+000	2+000	1,09	1,02
2+000	3+000	1,56	1,27
3+000	4+000	0,93	1,30
4+000	5+000	1,34	1,33
5+000	6+000	1,68	1,30
6+000	7+000	1,67	1,62
7+000	8+000	1,23	0,98
8+000	9+000	1,14	1,26
9+000	10+000	1,13	1,08
10+000	11+000	1,28	1,05

Fuente: Elaboración Propia

Se describe con más detalle la obtención de resultados generados en el tramo ida y vuelta mediante la metodología IRI para el índice de regularidad superficial en el anexo 2.

Resultado del IRI para todo el tramo en estudio

Tabla 30. Resultados IRI de todo el proyecto

PROGRESIVAS		IRI (m/Km)	CLASIFICACIÓN
prog. inicial	prog. final		
0+000	1+000	1,26	EXCELENTE
1+000	2+000	1,06	EXCELENTE
2+000	3+000	1,42	EXCELENTE
3+000	4+000	1,12	EXCELENTE
4+000	5+000	1,33	EXCELENTE
5+000	6+000	1,49	EXCELENTE
6+000	7+000	1,64	EXCELENTE
7+000	8+000	1,10	EXCELENTE
8+000	9+000	1,20	EXCELENTE
9+000	10+000	1,10	EXCELENTE
10+000	11+000	1,17	EXCELENTE

Fuente: Elaboración Propia.

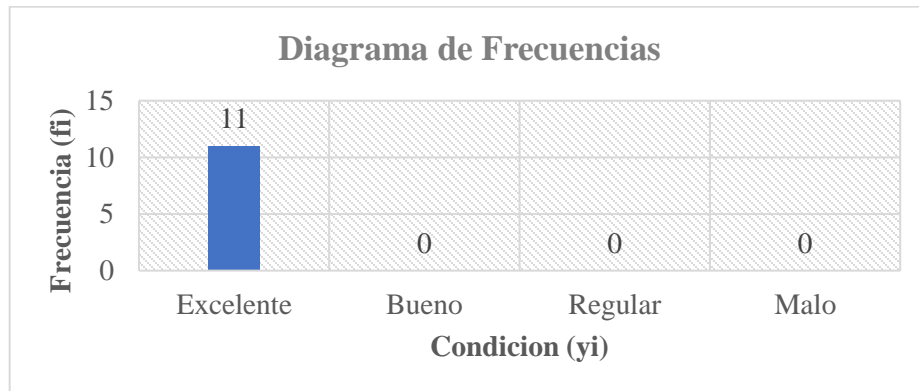
Tratamiento estadístico

Tabla 31. Tratamiento estadístico del IRI para todo el tramo en estudio

n	Condición (y _i)	Frecuencia (f _i)	Frecuencia relativa (h _i)		
			Fracción	Decimal	Porcentual (%)
1	Excelente	11	11/11	1	100
2	Bueno	0	0/11	0	0
3	Regular	0	0/11	0	0
4	Malo	0	0/11	0	0
	Σ	11	11/11	1	100

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 14. Diagrama de frecuencias del IRI



Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que gracias al tratamiento estadístico de las muestras en su totalidad se encuentra en condición excelente, lo cual nos indica según método IRI se clasifica en condiciones aptas para los usuarios.

3.3.4. Determinación de la macrotextura con la mancha de arena

Para determinar la macrotextura del pavimento se aplicó el método de la círculo o mancha de arena. El ensayo comenzó de la progresiva 0+000 realizando en ambos carriles cada 250 metros, efectuándolo en la huella externa de cada carril.

Procedimiento de ensayo

- Se tamizo la arena pasando el tamiz N100 y retenido en tamiz N200.

- Posterior con todo el material necesario en campo se comenzó el ensayo introduciendo la arena en la probeta de volumen conocido hasta los 25 ml y la pesamos registrando su peso.
- Continuamos eligiendo el lugar específico y limpiando completamente con la ayuda de una brocha, una vez limpio con la ayuda del embudo se vació la arena en el pavimento,
- con la ayuda del disco esparcidor se esparció la arena formando un círculo hasta que se cubrió completamente el sector y quedó sin bordes.
- Se prosiguió a medir 5 diámetros y a registrar en la planilla. Este procedimiento de lo realizo a lo largo de toda la vía.

Figura 41. Realización de la práctica de la Mancha de arena



Fuente: Elaboración Propia

Procedimiento de calculo

Para el cálculo del círculo de arena se midieron 5 diámetros por cada ensayo. Primeramente, se realizó el análisis por progresiva y después de todo el tramo en conjunto. El dato común para todos los ensayos realizados, es el volumen de la muestra es de $V=25000 \text{ mm}^3$. Como ejemplo se tomará la progresiva 2+500 (ida)

Comenzamos obteniendo el promedio de los cinco diámetros levantados:

$$Promedio = \frac{D1 + D2 + D3 + D4 + D5}{5}$$

$$Promedio = \frac{200 + 180 + 190 + 190 + 190}{5}$$

$$Promedio = 190 \text{ mm}$$

Calculamos el promedio de profundidad de macrotextura:

$$MTD = \frac{4 * V}{\pi * D^2}$$

$$MTD = \frac{4 * 25000}{\pi * 190^2}$$

$$MTD = 0,88 \text{ mm}$$

Resultados parciales por ensayo realizado:

Tabla 32. Resultados de la macrotextura de la progresiva 2+500 (ida)

IDA	Diámetros de los círculos (cm)					Promedio	MTD
	1	2	3	4	5		
progresiva	200	180	190	190	190	190	0,88

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 33. Clasificación de la textura

MTD	TEXTURA
< 0,20	Muy fina
0,21 - 0,40	Fina
0,41 - 0,80	Media
0,81 - 1,20	Gruesa
> 1,20	Muy gruesa

Fuente: Leiva, F. (2005). "Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos"

Para la determinada progresiva se obtiene una clasificación de "textura gruesa".

Se repite para cada uno de los ensayos el mismo procedimiento, el resultado se realizó cada 250 m, entonces cada 4 datos se determina un promedio, el cual es el resultado de la progresiva de estudio, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 34. Resultados progresivos de la macrotextura tramo ida y vuelta

Prog. Inicial	Prog. Final	MTD (mm) Ida	Clasificación Parcial	MTD (mm) Vuelta	Clasificación Parcial
0+000	1+000	0,81	gruesa	0,77	Media
1+000	2+000	0,84	gruesa	0,78	Media
2+000	3+000	0,83	gruesa	0,88	Gruesa
3+000	4+000	0,75	media	0,79	Media
4+000	5+000	0,72	media	0,90	Gruesa
5+000	6+000	0,85	gruesa	0,72	Media
6+000	7+000	0,73	media	0,73	Media
7+000	8+000	0,81	gruesa	0,81	Gruesa
8+000	9+000	0,77	media	0,77	Media
9+000	10+000	0,63	media	0,65	Media
10+000	11+000	0,61	media	0,71	Media

Fuente: Elaboración Propia

Se describe con más detalle la obtención de la macrotextura en el tramo progresivo ida y vuelta mediante el ensayo de la mancha de arena en el anexo 3.

3.3.5. Determinación de la microtextura con el péndulo británico

Para determinar la microtextura, procede a ensayar la superficie del pavimento con el péndulo británico, el cual proporciona una resistencia al patinaje de acuerdo al grado de pulidez del pavimento. La práctica se comenzó de la misma progresiva 0+000 como la práctica anterior. El ensayo se realizó en ambos carriles cada 250 metros, efectuando en la huella eterna de cada carril.

Procedimiento del ensayo

- Con el equipo en el lugar y con ayuda del personal se procedió a su armado del equipo.
- Una vez colocado en el lugar elegido se realizó a la nivelación con guía de la burbuja del equipo.
- Se procedió a colocar el termómetro cerca del péndulo sin que perjudique al equipo para determinar la temperatura del pavimento.
- Una vez nivelado el equipo se procedió a medir la longitud de rose de la zapata con la ayuda del tornillo superior hasta lograr la longitud que nos indique la regla del equipo.

Figura 42. Preparando el equipo para realización del ensayo



Fuente: Elaboración Propia

- Ya con todas las nivelaciones se procede a colocar el brazo del péndulo en posición horizontal hasta que quede enganchado automáticamente en el equipo.
- Se roció con agua el sector del suelo donde oscilara.
- Posterior colocando la aguja indicadora en cero siguiendo presionamos el pulsador que suelta el brazo del péndulo para que oscile.

Figura 43. Lectura de la resistencia al patinaje con el péndulo británico



Fuente: Elaboración propia

- Se realizó la lectura y anotación del Angulo de oscilación que nos indica el panel. Realizamos este mismo procedimiento 5 veces obteniendo 5 lecturas.

Figura 44. Progresiva final con el ensayo del péndulo británico



Fuente: Elaboración Propia.

Procedimiento de calculo

Para el cálculo del péndulo británico de las 5 lectura (BPN) se saca el promedio de lecturas y posterior se corrige la temperatura del pavimento. Como ejemplo se tomará la progresiva 2+500 (ida).

Tabla 35. Datos levantados y promedio para progresiva 2+500 (ida)

IDA	T°C	Ensayo Péndulo Británico					Promedio
		medidas de BPN (Adm.)					
progresiva		1	2	3	4	5	
2+500	18	78	76	76	78	78	77,2

Fuente: Elaboración Propia

Cálculo de FA:

$$FA = \frac{1}{(1 - 0,00525) * (T - 20)}$$

Donde:

T= Temperatura °C

$$FA = \frac{1}{(1 - 0,00525) * (18 - 20)}$$

$$FA = 0,99$$

Cálculo de BPNA

$$BPNA = Prom * FA$$

Prom: promedio de las lecturas

$$BPNA = 77,2 * 0,99$$

$$BPNA = 76,4$$

Cálculo de RD

$$RD = \frac{BPNA}{1000}$$

$$RD = \frac{76,4}{1000}$$

$$RD = 0,76$$

Tabla 36. Resultado de la microtextura para progresiva 2+000 (ida)

IDA	T°C	FA	Ensayo Péndulo Británico					Promedio	BPNA	RD
			Medidas de BPN (Adm.)							
Progresiva			1	2	3	4	5			
2+500	18	0,99	78	76	76	78	78	77,2	76,4	0,76

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 37. Calificación de la microtextura

RD	CLASIFICACIÓN
<0,5	Malo (Deslizamiento)
0,51-0,6	De regular a malo
0,61-0,8	Bueno
0,81-0,9	De bueno a regular
>0,91	Malo (Desgaste de neumáticos)

Fuente: Leiva, F. (2005). "Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos"

Para determinada progresiva se obtiene como clasificación de "bueno".

Se repite para cada uno de los ensayos el mismo procedimiento, el resultado se realizó cada 250 m, entonces cada 4 datos se determina un promedio, el cual es el resultado de la progresiva de estudio, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 38. Resultados de la microtextura para cada kilómetro ida y vuelta

Prog. Inicial	Prog. Final	RD (mm) Ida	Clasificación Parcial	RD (mm) Vuelta	Clasificación Parcial
0+000	1+000	0,83	de bueno a regular	0,92	malo
1+000	2+000	0,70	Bueno	0,79	bueno
2+000	3+000	0,82	de bueno a regular	0,87	de bueno a regular
3+000	4+000	0,75	Bueno	0,78	bueno
4+000	5+000	0,84	de bueno a regular	0,82	de bueno a regular
5+000	6+000	0,85	de bueno a regular	0,79	bueno
6+000	7+000	0,84	de bueno a regular	0,84	de bueno a regular
7+000	8+000	0,82	de bueno a regular	0,77	bueno
8+000	9+000	0,78	Bueno	0,82	de bueno a regular
9+000	10+000	0,85	de bueno a regular	0,87	de bueno a regular
10+000	11+000	0,83	de bueno a regular	0,86	de bueno a regular

Fuente: Elaboración Propia

Se describe con más detalle la obtención de la microtextura en el tramo progresivo ida y vuelta mediante el ensayo del péndulo británico en el anexo 3.

3.3.6. Determinación del IFI (Índice de Fricción Internacional)

Para la obtención del IFI, es a través de los ensayos del círculo de arena y el péndulo británico, los mismos que se usaron para la determinación de la macro y micro textura. Como ejemplo se tomará la progresiva 2+500 de (ida).

Tabla 39. Promedio Péndulo Británico

IDA	T°C	Péndulo Británico					Promedio
		Medidas de BPN (Adm.)					
Progresiva		1	2	3	4	5	
2+500	18	78	76	76	78	78	77,2

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 40. Promedio círculo de arena

IDA	Ensayo círculo de arena					Promedio
	Diámetros de los círculos (mm)					
Progresiva	1	2	3	4	5	
2+500	200	190	190	190	190	192

Fuente: Elaboración Propia

Se calcula el valor de fricción del pavimento para una velocidad de 60 km/h “FR60”, se utiliza el valor promedio de fricción de las mediciones obtenida de campo “FRS” (mediciones realizadas en la unidad de muestra que se realizó el círculo de arena) con un valor de S= 10 km/h se obtiene.

Tabla 41. BPN promedio corregido

Progr.	T °C	Coef. De Corr.	BPN corregido (Adm.)					Prom.
2+500	18,00	-0,52	77,48	75,48	75,48	77,48	77,48	76,68

Fuente: Elaboración Propia

Cálculo de la textura media del pavimento, mediante la siguiente ecuación

$$Tx = \frac{4 * V}{\pi * Dp^2}$$

Donde:

Tx= Textura media del pavimento

V= Volumen de arena utilizado = 25000 mm³

Dp= Promedio de diámetros de progresivas = 19,2 cm

$$Tx = \left(\frac{4 * 25cm^3}{\pi * (19,2 cm)^2} \right) x 10 \frac{mm}{cm}$$

$$Tx = \frac{4 * 25000mm^3}{\pi * (19,2)^2} = 0,86 mm$$

Calculo determinación de velocidad Sp

$$Sp = a + b * Tx$$

Donde:

Sp= Constante de velocidad

Tx= Altura de macrotextura del pavimento

a y b son constantes según Norma ASTM E 695 son (a= -11,5981; b= 113,6325)

$$Sp = -11,5981 + 113,6325 * 0.86$$

$$Sp = 86,47 \frac{km}{hr}$$

Determinación del parámetro F60

$$FR60 = FRs * e^{\left(\frac{S-60}{Sp}\right)}$$

Donde:

FR60 = Fricción de referencia a una velocidad de 60 km/h

FRs= 76.68 dato obtenido de promedio de lecturas BPN de la progresiva ejemplo

S= Velocidad de operación del péndulo = 10 km/hr

Sp= Constante de velocidad (km/hr) = 86,47

$$FR60 = 76,68 * e^{\left(\frac{10-60}{86,47}\right)}$$

$$FR60 = 43,01$$

Cálculo de F60

$$F60 = A + B * FR60$$

Donde:

F60 = Estimado de la fricción en la curva idealizada a 60 km/h

A y B son las constantes según Norma ASTM E 274 son (A=0,078 y B= 0,0107)

FR60= Fricción de referencia a una velocidad de 60 km/h.

$$F60 = 0,078 + 0,0107 * 43,01$$

$$F60 = 0,538$$

Finalmente se puede calcular la fricción para cualquier velocidad de circulación de los vehículos con el modelo

$$F(S) = F60 * e^{\left(\frac{60-S}{Sp}\right)}$$

Donde:

F(S) = Fricción de una velocidad estimada

F60 = Estimado de la fricción en la curva idealizada a 60 km/h

S= Velocidad de operación del equipo

Sp= Constante de velocidad (km/hr)

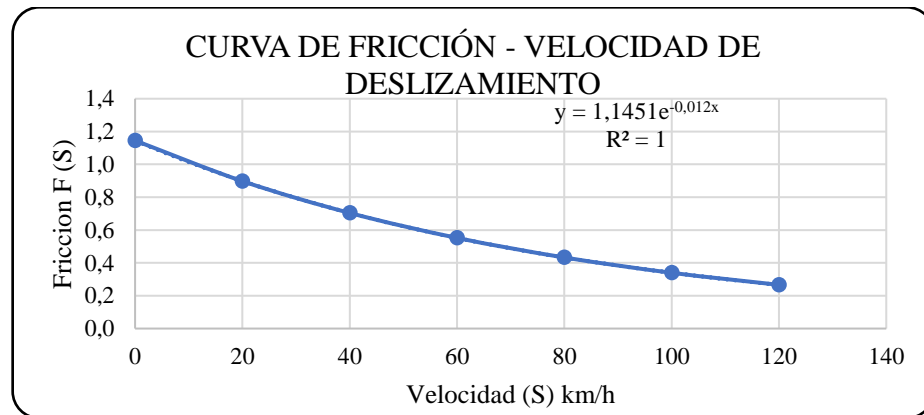
Tabla 42. Valores para el grafico e la curva "fricción vs velocidad"

S	0	20	40	60	80	100	120
	F (0)	F (20)	F (40)	F (60)	F (80)	F (100)	F (120)
F (S)	1,145	0,898	0,704	0,552	0,433	0,340	0,266

Fuente: Elaboración Propia

El grafico determina la curva de fricción según la velocidad de deslizamiento, como se observa en el grafico siguiente:

Gráfico 15. Curva de fricción vs velocidad de deslizamiento



Fuente: Elaboración Propia

Valor de fricción mínima según el manual de la ABC = 0,373

Velocidad máxima segura para determinada progresiva es:

$$V_{max} = 1,1451 * e^{-0,0112*0,373}$$

$$V_{max} = 63,47 \frac{km}{hr}$$

Se repite para cada uno de los ensayos el mismo procedimiento, el resultado se realizó cada kilómetro, tomando el promedio de 4 ensayos de mancha de arena y péndulo británico, el resultado de la progresiva de estudio se observa en la siguiente tabla:

Tabla 43. Resultados finales IFI por kilómetro ida y vuelta

Progresiva inicial	Progresiva final	IFI. (Km/h)	
		IDA	VUELTA
0+000	1+000	93,63	100,42
1+000	2+000	81,16	84,06
2+000	3+000	93,47	105,92
3+000	4+000	77,73	85,43
4+000	5+000	85,43	102,04
5+000	6+000	95,22	81,66
6+000	7+000	84,45	83,97
7+000	8+000	93,79	89,00
8+000	9+000	83,67	87,52
9+000	10+000	70,88	75,80
10+000	11+000	70,54	77,71

Fuente: Elaboración Propia

Se describe con más detalle la obtención de la velocidad máxima segura en el tramo progresivo ida y vuelta mediante el método IFI en el anexo 3.

3.4. Evaluación estructural

La evaluación estructural se ha llevado a cabo mediante ensayos no destructivos empleando la medición de las deflexiones con la viga Benkelman que consiste en estudiar las deformaciones verticales que experimentan las diferentes capas del paquete estructural cuando está actuando sobre el pavimento.

3.4.1. Método no destructivo con la Viga Benkelman

La viga benkelman es probablemente es la más popular y económica de medición de deflexiones superficiales del pavimento y el mismo permite medir el rebote de la deflexión estática de un pavimento asfáltico bajo la aplicación de la carga. El ensayo comenzó de la progresiva 0+000 realizando en ambos carriles cada 250 metros, efectuando a 0,9 m del borde del pavimento.

Procedimiento de ensayo

- Se efectuó inicialmente la calibración de la viga Benkelman con una relación del brazo para optimizar el instrumento. Se utilizó para el cálculo $k=1$.
- Para proceder el ensayo se realizó una medición de presión de llantas de 90 psi.

- Posteriormente se realizó el pesado de la volqueta en una balanza eléctrica, obteniendo un peso de 8,290 tn de capacidad con el eje trasero simple y llantas dobles.

Figura 45. Recibo de pesado de volqueta

BALANZA "MENDOZA"		N° 3169	
KM 7.5 CARRETERA AL CHACO		Ingreso: 2/5/2024 5:56:40 PM	
CEL: 70218371 - 75128566		Salida: 2/5/2024	
Tarija - Bolivia			
BRUTO:	0	TARA: 8.290	NETO: 0
		QQ.:	0,00
Vendedor:	s/n s/n		
Comprador:	JOSE ARMANDO LIMACHI DELGADO		
Chofer:	FROILAN ZENTENO	CI:	N/S
Placa:	3021 RFY NISSAN AMARILLO		
Tipo Vehiculo:	VOLQUETA		
Material:	s/n		
Monto Bs.:	40		
Observacion:			
 ENCARGADO BALANZA JALDIN MELVA		 CLIENTE	

Fuente: Elaboración Propia

Figura 46. Pesaje de la volqueta en la balanza electrónica



Fuente: Elaboración Propia

- Se produjo a ensamblar la viga ya que tienen un brazo desplegable de dos módulos con cual se realiza el ajuste de los tornillos.

Figura 47. Punto de partida y ensamblado de la viga Benkelman



Fuente: Elaboración Propia

- Posteriormente se nivela en el apoyo principal con una regla niveladora para lograr que el puntero del brazo de la viga este en contacto mínimo con la superficie asfáltica. Se repite el procedimiento para cada puntos definidos de estudio a lo largo de la vía, una vez ensamblado el equipo correctamente se registran lecturas en cada punto de ensayo a 0, 50, 100, 150, 200 y a 500 (cm), el ensayo en un extremos se coloca la viga entre las ruedas traseras de la volqueta a usarse sobre el punto de manera tal que este coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de la llanta, dejando el otro extremo fijo sobre el pavimento, se registró le temperatura el pavimento. Se repiten todo lo descrito a lo largo del tramo ida y vuelta en las coordenadas de estudio.

Figura 48. Lectura a diferencias distancias con la viga Benkelman



Fuente: Elaboración Propia

Figura 49. Medición de la temperatura durante el ensayo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 50. Progresiva final 11+000 (Ida), punto de llegada del ensayo de viga Benkelman



Fuente: Elaboración Propia

Procedimiento de cálculo

Obteniendo los datos levantados del tramo los valores corresponden a las deformaciones en un proceso de descarga en un valor o lectura final será menor que el inicial. Se calculará los indicadores de estado de la estructura del pavimento, que son la deflexión máxima y el radio de curvatura. Como ejemplo se tomará la progresiva 2+500 (ida).

Tabla 44. Lecturas del ensayo en progresiva 2+500 (ida)

PROGRESIVA (Km)	LECTURAS DEL DIAL (0,01mm)						TEMPERATURAS		Espesor asfalto (cm)
	L- 0cm	L- 50cm	L- 100cm	L- 150cm	L- 200cm	L- 500cm	Amb °C	Asfalto °C	
2+500	0	4	4	6	8	10	12,0	32,0	5,00

Fuente: Elaboración Propia

Cálculo de la deflexión máxima:

$$D_o = (L_o - L_f) * k$$

$$D_o = (10 - 0) * 1$$

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

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad:

El valor de las deflexiones debe corregirse por temperatura según norma, que deben ser llevados a una temperatura de 20°C, para la corrección de estacionalidad se adopta un factor de 1,2

$$D_{ot} = \frac{D_o}{k * (T - 20^\circ\text{C}) * e + 1} * F_{ce}$$

$$D_{ot} = \frac{10}{0,001 \frac{^\circ\text{C}}{\text{cm}} * (32^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) * 5 + 1} * 1,2$$

$$D_{ot} = 11 * 10^{-2} \text{ mm}$$

Deflexión a 50 cm:

$$D_{50} = (L_f - L_{50}) * k$$

$$D_{50} = (10 - 4) * 1$$

$$D_{50} = 6 * 10^{-2} \text{ mm}$$

Factor de corrección por temperatura y estacionalidad:

$$D50t = \frac{D50}{k * (T - 20^{\circ}\text{C}) * e + 1} * Fce$$

$$D50t = \frac{6}{0,001^{\circ} \frac{C}{cm} * (32^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) * 5 + 1} * 1,2$$

$$D50t = 7 * 10^{-2}mm$$

Radio de curvatura

$$Rc = \frac{6250}{k * (Dot - D50t)}$$

$$Rc = \frac{6250}{2 * (11 - 7)}$$

$$Rc = 781 m$$

Tabla 45. Resultados de deflexión y radio de curvatura progresiva 2+500 (ida)

PROGRESIVA (Km)	PARÁMETROS DE EVALUACIÓN			PARÁMETROS DE EVALUACIÓN CORREGIDOS		
	Do (0.01 mm)	D50 (0.01 mm)	RC (m)	Do' (0.01 mm)	D50' (0.01 mm)	RC' (m)
2+500	10,00	6,00	781	11,00	7,00	781,25

Fuente: Elaboración Propia

Y así sucesivamente se realiza el cálculo para cada uno de los datos levantados en cada progresiva, se puede observar con mayor detalle los resultados en el anexo 4.

Tratamiento estadístico

Carril derecho (ida)

Estadística descriptiva

n= 45

X= 10,69

R=14,00-9,00=5

NC=1+3.332*log(n)=7

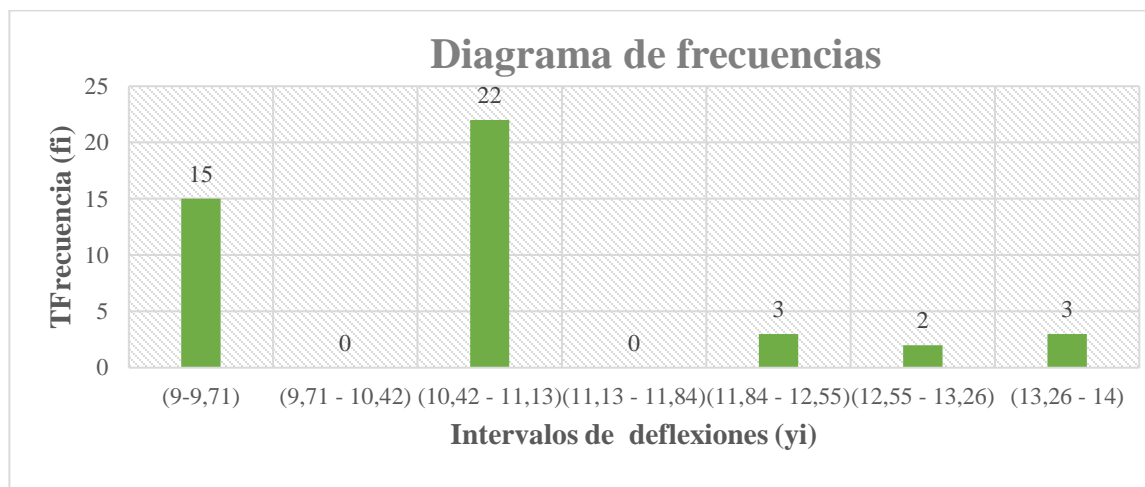
a=0,71

Tabla 46. Frecuencias viga Benkelman carril derecho

n	Intervalos de deflexiones (yi)	Frecuencia (fi)	Frecuencia relativa (hi)		
			Fracción	Decimal	Porcentual (%)
1	(9-9,71)	15	15/45	0,33	33
2	(9,71 - 10,42)	0	0/45	0,00	0
3	(10,42 - 11,13)	22	22/45	0,49	49
4	(11,13 - 11,84)	0	0/45	0,00	0
5	(11,84 - 12,55)	3	3/45	0,07	7
6	(12,55 - 13,26)	2	2/45	0,04	4
7	(13,26 - 14)	3	3/45	0,07	7
	Σ	45	1	1,00	100

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 16. Diagrama de frecuencias viga Benkelman carril derecho (ida)



Fuente: Elaboración Propia

Carril izquierdo (Vuelta)

Estadística descriptiva

n= 45

X= 11,98

R=16,00-7,00=9

NC=1+3,332*log (45) =7

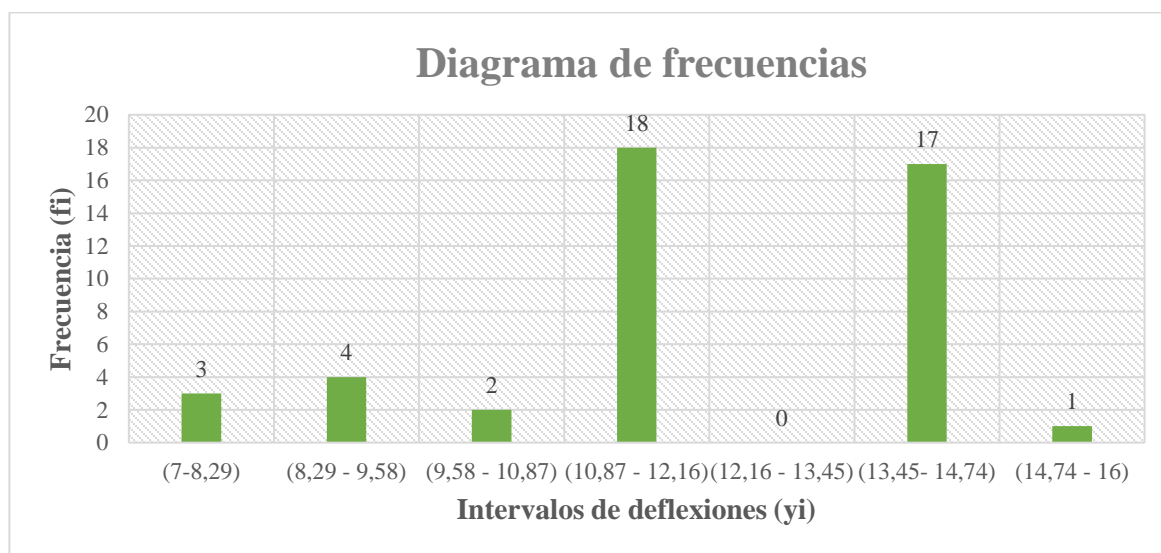
a= 1,29

Tabla 47. Frecuencias viga Benkelman carril izquierdo

n	Intervalos de deflexiones (yi)	Frecuencia (fi)	Frecuencia relativa (hi)		
			Fracció n	Decima l	Porcentual (%)
1	(7-8,29)	3	3/45	0,07	7
2	(8,29 - 9,58)	4	4/45	0,09	9
3	(9,58 - 10,87)	2	2/45	0,04	4
4	(10,87 - 12,16)	18	18/45	0,40	40
5	(12,16 - 13,45)	0	0/45	0,00	0
6	(13,45- 14,74)	17	17/45	0,38	38
7	(14,74 - 16)	1	1/45	0,02	2
	Σ	45	1	1,00	100

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 48. Diagrama de frecuencias viga Benkelman carril izquierdo



Fuente: Elaboración Propia

Resultados Característicos de deflexiones y radios de curvatura

Tabla 49. Resultados de las deflexiones y radio de curvatura ida y vuelta del tramo en estudio

PROGRESIVAS		Dc (0,01 mm)		RC (m)	
Prog. Inicial	Prog. Final	IDA	VUELTA	IDA	VUELTA
0+000	1+000	12,33	12,90	960,60	759,18
1+000	2+000	11,15	15,15	781,25	840,20
2+000	3+000	14,64	15,15	972,94	920,71
3+000	4+000	12,82	14,15	870,70	840,20
4+000	5+000	12,22	14,90	870,70	637,95
5+000	6+000	14,22	17,66	972,94	792,58
6+000	7+000	14,22	15,35	920,71	814,65
7+000	8+000	13,15	15,35	919,48	931,83
8+000	9+000	11,90	11,65	870,70	851,52
9+000	10+000	13,69	14,66	886,95	727,23
10+000	11+000	12,15	14,90	870,70	879,60

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados finales de la evaluación superficial

Después de un trabajo arduo de campo y de gabinete se obtiene de todo el tramo información a través de métodos que determinan las condiciones de la superficie y estructura del pavimento, se obtiene un análisis para cada método estudiado.

4.1.1. Análisis de resultados por el método PCI

Análisis Resultados PCI por kilómetro de la vía

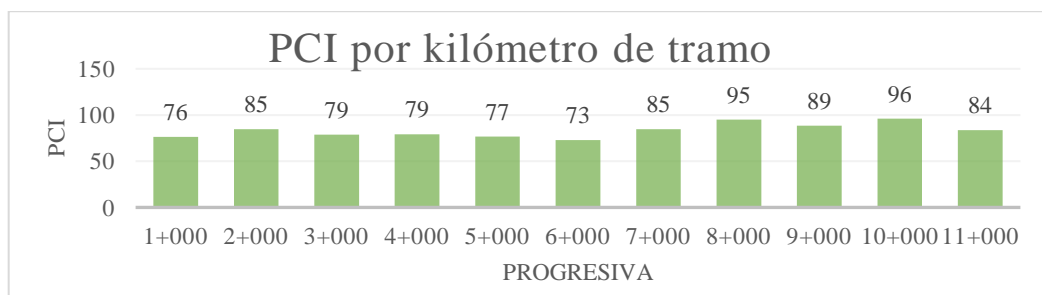
La presente tabla nos muestra el índice de condición de pavimento expresada una escala de gradación de colores que permite definir la severidad del daño al que se encuentra el pavimento flexible mediante la siguiente tabla:

Tabla 50. Resultados por kilómetro y clasificación del PCI

Progresivas		PCI	Calificación	Color
0+000	1+000	76	MUY BUENO	
1+000	2+000	85	MUY BUENO	
2+000	3+000	79	MUY BUENO	
3+000	4+000	79	MUY BUENO	
4+000	5+000	77	MUY BUENO	
5+000	6+000	73	MUY BUENO	
6+000	7+000	85	MUY BUENO	
7+000	8+000	95	EXCELENTE	
8+000	9+000	89	EXCELENTE	
9+000	10+000	96	EXCELENTE	
10+000	11+000	84	MUY BUENO	

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 17. Resultados por kilómetro del PCI.



Fuente: Elaboración Propia

Como estudio progresivo del tramo se obtiene según la tabla 50. que la mayoría del tramo Copacabana – Yunchará se encuentra en condición “muy bueno” y tres kilómetros están en perfectas condiciones obteniendo una calificación de “excelente”.

Análisis Resultados PCI por secciones del tramo

La presente tabla nos muestra el índice de condición de pavimento por secciones de tramo el cual se obtuvo dividió en tres secciones de estudio.

Tabla 51. Resultados PCI para las tres secciones de estudio

Progresivas		PCI	Calificación	Color
0+000	4+000	79	MUY BUENO	
4+000	8+000	82	MUY BUENO	
8+000	11+000	89	EXCELENTE	

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de las secciones de estudio como se muestra en la tabla 51. se encuentran dos secciones en condiciones “muy bueno” y una sección clasifica como “excelente”, como resultado teniendo una condición “muy buena” de todo el tramo de estudio Copacabana – Yunchará.

Análisis resultados PCI para el proyecto

La presente tabla nos muestra el índice de condición de pavimento para todo el tramo de estudio “tramo Copacabana – Yunchará”.

Tabla 52. Resultados y clasificación PCI para el proyecto

Progresivas		PCI	Calificación	Color
0+000	4+000	84	MUY BUENO	

Fuente: Elaboración Propia

Como resultado final de todo el proyecto se encuentra en “muy bueno”, con un PCI= 84 de todo el tramo estudiado, dejando en claro que el estudio realizado del tramo vial se encuentra en buenas condiciones de circulación.

Análisis de resultados según el porcentaje de cada tipo de falla en todo el tramo de estudio

Después del análisis de resultado del método PCI por kilómetros, secciones y del tramo en estudio se procede a analizar el porcentaje de fallas de todo el tramo “Copacabana Yunchará” para su posible determinación de un plan de mejoras de cada falla encontrada en el tramo de estudio.

Tabla 53. Cuantificación de fallas para todo el tramo

TRAMO COPACABANA - YUNCHARÁ				
PROGRESIVA: 0+000 - 11+000				
Nº	Falla	Unidad	Severidad	Cantidad
1	Piel de cocodrilo	m ²	L	114,59
			M	3,18
4	Abultamiento y hundimiento	m ²	L	20
			M	
19	Meteorización /Desprendimiento de Agregados	m ²	L	646,319
			M	
10	Fisuras long. y/o transv.	m	L	116,2
			M	
2	Exudación	m ²	L	270,77
			H	32,96
11	Parche	m ²	L	
			M	41
9	Desnivel carril/berma	m	L	18,89
			M	
15	Ahuellamiento	m ²	L	14
			M	
6	Depresión	m ²	L	8
			M	

Fuente: Elaboración Propia

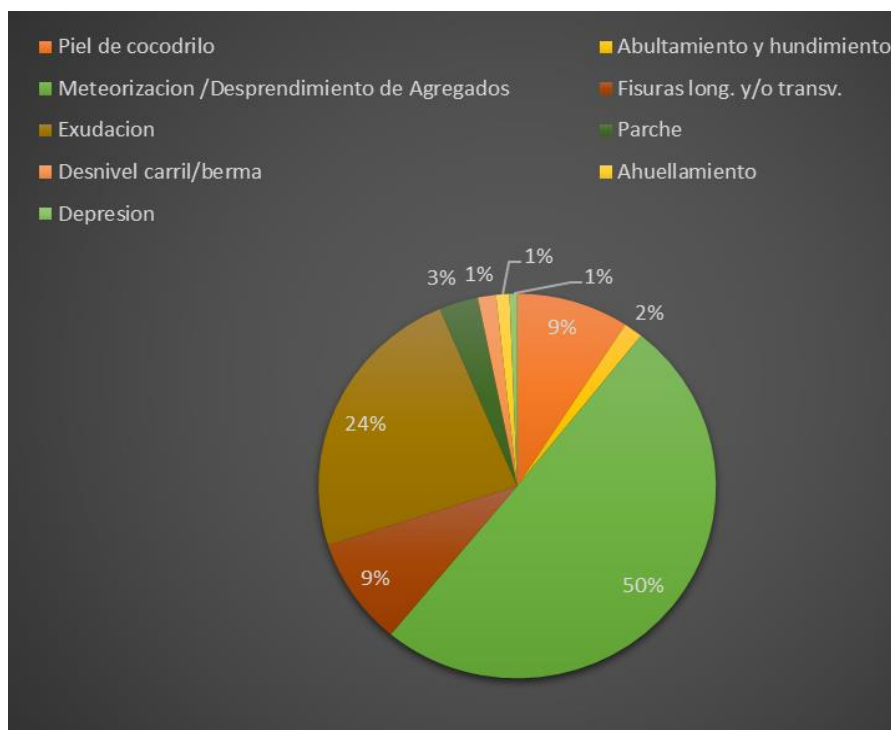
Como resultado de porcentaje de todo el tramo “Copacabana – Yunchará” se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 54. Porcentaje de cada tipo de falla en el tramo de estudio

TRAMO COPACABANA - YUNCHARÁ		
PTOGRESIVA: 0+000 - 11+000		
Nº	TIPO DE FALLA	%
1	Piel de cocodrilo	9%
4	Abultamiento y hundimiento	2%
19	Meteorización /Desprendimiento de Agregados	50%
10	Fisuras long. y/o transv.	9%
2	Exudación	24%
11	Parche	3%
9	Desnivel carril/berma	1%
15	Ahuellamiento	1%
6	Depresión	1%

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 18. Porcentaje de fallas en tramo.



Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la tabla 54. y en la gráfico 18, la falla predominante en el tramo “Copacabana – Yunchará” es meteorización/desprendimiento de agregados con un 50 %, otra falla considerable en el tramo es la exudación con un 24 % y fallas de fisuras longitudinales y transversales y piel de cocodrilo con un 9%. El resto de las fallas son

menos considerables y con porcentajes mucho más bajos comparado al de las fallas ya mencionadas.

Alternativas de solución

El estado del pavimento flexible del tramo aún se encuentra en una condición Muy buena en el cual las fallas de mayor porcentaje obtienen una severidad baja, por lo tanto, es un buen momento para intervenir el tramo así evitar mayor severidad y mayores fallas y por lo tanto mayor costo de mantenimiento.

- Mantenimiento periódico

Las fallas con severidad baja no requieren ningún tipo de mantenimiento debido a que aún es posible permitir su presencia en la vía, ya que no afectan de manera significativa en la comodidad de los usuarios. Las fallas de severidad media y alta se han optado por realizar un bacheo en áreas localizadas que presenten agrietamientos, hundimientos exudación y disgregación. El procedimiento consiste en limpiar la superficie, aplicar el riego asfáltico, extender y compactar la mezcla.

En la tabla siguiente se muestran los trabajos de mantenimiento y rehabilitación de la vía según el tipo de falla y nivel de severidad presentes.

Tabla 55. Operaciones de mantenimiento y rehabilitación para cada falla.

Mantenimiento y rehabilitacion tramo "Copacabana - Yunchara"							
Falla	Severidad	Sellado de fisuras (m)	Corte de carpeta asfaltica (m ²)	trazado y replanteo (m ²)	limpieza y retiro de material (m ³)	imprimacion (m ²)	carpeta asfaltica en caliente (m ²)
1. Piel de cocodrilo	L						
	M		X	X	X	X	X
	H		X	X	X	X	X
4. Abultamiento y hundimiento	L						
	M		X	X	X	X	X
	H		X	X	X	X	X
19.Meteorizacion/desprendimiento de agregados	L						
	M		X	X	X	X	X
	H		X	X	X	X	X
10. Fisuras long. y/o transv.	L	X					
	M	X					
	H	X					
2. Exudacion	L						
	M		X	X	X	X	X
	H		X	X	X	X	X
11. Parche	L						
	M		X	X	X	X	X
	H		X	X	X	X	X
9. Desnivel de carril/berma	L						
	M		X	X	X	X	X
	H		X	X	X	X	X
15. Ahuellamiento	L						
	M		X	X	X	X	X
	H		X	X	X	X	X
6. Depresion	L						
	M		X	X	X	X	X
	H		X	X	X	X	X

Fuente: Elaboración Propia

Plan de mejoras de las fallas encontradas en el tramo vial

El tramo de estudio “Copacabana – Yunchará” se encuentra en buenas condiciones, aun existiendo fallas de severidad media y baja. Mediante el método del PCI y tablas analizadas anteriormente, tenemos nueve fallas encontradas a lo largo del tramo, por ende, estudiaremos cada falla y proponemos una mejora de cada una la cual especifica en la siguiente tabla:

Tabla 56. Plan de mejoras de las fallas encontradas en el tramo vial

Falla	Descripción	Causa(s) Común(es)	Objetivo de Mejora	Acciones Correctivas	Recursos Necesarios	Indicadores de Éxito
1. Piel de cocodrilo	Grietas interconectadas que forman un patrón similar a la piel de un cocodrilo	Fatiga del pavimento debido a cargas repetitivas, deficiencia en la base	Eliminar grietas y prevenir su reaparición.	Reparación de grietas con selladores, fresado y colocación de una nueva capa de rodadura	Fresadora, emulsión asfáltica, sellador de grietas.	Superficie lisa sin grietas visibles
4. Abultamiento y hundimiento	Elevación o depresión localizada del pavimento	Pavimentos inestables, Expansión de la subbase, asentamiento del suelo, infiltración y elevación del material en una grieta en combinación con las cargas del tránsito	Restablecer la uniformidad de la superficie del pavimento.	Remoción del área afectada, reparación de la subbase, reinstalación de capas de pavimento. Parcheo profundo o parcial	Equipos de excavación, materiales de relleno, compactadora, asfalto.	Superficie nivelada y estable
19. Meteorización / Desprendimiento de Agregados	Pérdida de material superficial del pavimento	Perdida del ligante asfáltico, Exposición a condiciones climáticas extremas, envejecimiento del asfalto, tránsito de vehículos de orugas, derramamiento de aceites.	Mejorar la resistencia superficial del pavimento.	Aplicación de una capa de sellado superficial o micro pavimento, parcheo parcial.	Sellador asfáltico, capa de rodadura	Superficie uniforme sin desprendimientos

10. Fisuras longitudinal y/o transversal	Grietas que se extienden a lo largo o a través del pavimento	Junta de carril del pavimento pobremente construida, construcción de la superficie de concreto asfáltico debido a las bajas temperaturas o al endurecimiento del asfalto, grieta de deflexión causada por el agrietamiento bajo la capa de la base.	Sellar grietas para evitar la penetración de agua y el deterioro.	Sellado de grietas, aplicación de una capa de recubrimiento	Herramientas de limpieza, sellador flexible, asfalto.	Grietas selladas y sin filtraciones de agua
2. Exudación	Película de material bituminoso, Aparición de asfalto en la superficie del pavimento.	Exceso de aplicación de sellante asfalto en la mezcla, bajo contenido de vacíos de aire o altas temperaturas	Eliminar el exceso de asfalto y restaurar la fricción superficial.	Aplicación de arena o agregados finos para absorber el exceso de asfalto, fresado y recubrimiento si es necesario	Arena/grava, barrendera, sellador asfáltico.	Superficie sin exudación y adecuada fricción.
11. Parche	Reparación de áreas dañadas del pavimento con nuevo material	Deterioro localizado	Eliminar baches o cualquier tipo de falla alterada.	Sustitución del parche mediante: Compactación adecuada del parche, uso de materiales de calidad, nivelación	Equipo de excavación, Asfalto y compactadora	Superficie homogénea sin diferencias de nivel
9. Desnivel carril/berma	Diferencias de niveles entre el borde del pavimento y la berma	Erosión de la berma, el asentamiento de la berma o la colocación de sobrecarpeta en la calzada sin ajustar el nivel de la berma	Nivelar la transición entre el carril y la berma.	Relleno y nivelación de la berma, recubrimiento del pavimento del carril si es necesario	Asfalto, equipo de nivelación	Superficie nivelada sin diferencias de altura

15. Ahuellamiento	Depresiones longitudinales en la superficie de las huellas de las ruedas.	Producida por consolidación o movimiento lateral de los materiales debido a las Cargas transito repetitivas, mezcla asfáltica inadecuada	Reducir el ahuellamiento y mejorar la capacidad de carga.	Fresado de las áreas a huelladas, aplicación de una nueva capa de rodadura	Fresadora, mezcla asfáltica resistente, compactadora.	Superficie lisa sin huellas
6. Depresión	Áreas localizadas de la superficie del pavimento con niveles ligeramente más bajos que el pavimento a su alrededor	Asentamiento de la subrasante o por una construcción incorrecta, fallo estructural	Eliminar depresiones y restaurar la superficie nivelada.	Remoción del área afectada, relleno con material adecuado, recubrimiento asfáltico. Parcheo superficial	Equipos de excavación, materiales de relleno, compactadora, asfalto.	Superficie nivelada y estable

Fuente: Elaboración Propia

Presupuesto de mantenimiento y rehabilitación

Para el determinado estudio y mediante la identificación de fallas se prosigue a una evaluación económica de presupuesto para su mantenimiento y rehabilitación del pavimento flexible en las áreas localizada del tramo de estudio, dando por conocer que el tramo se encuentra en condicione buenas de circulación y obteniendo fallas de severidad baja y media, por el cual para es un buen momento de intervenir y realizar el mantenimiento de las fallas localizadas y así evitar gastos mayores, porque con el pasar del tiempo y su uso del tramo vial. Las fallas Irán subiendo su severidad y mayores fallas en el tramo vial. Por el cual se obtiene la siguiente tabla de un presupuesto general de mantenimiento periódico para el tramo vial.

Tabla 57. Presupuesto general de mantenimiento periódico del tramo vial Copacabana-Yunchará

Nº	Descripcion	Unidad	Cantidad	P.U	Parcial
1	Señalizacion areas de trabajo	gbl	1,00	3383,43	3383,43
2	Replanteo y trazado en carpeta asfaltica	m ²	1150,82	10,77	12394,82
3	Sellado de grietas y fisuras	m	135,09	18,41	2486,93
4	Corte de carpeta asfaltica	m ²	1150,82	32,27	37136,74
5	Imprimacion	m ²	1150,82	6,39	7359,30
6	Carpeta asfaltica	m ²	1150,82	190,58	219323,38
7	Limpieza y retiro de material	m ³	57,54	67,99	3912,48
8	Pintado de lineas continuas e= 0,10 m	m	22000,00	10,22	224896,07
9	Pintado de lineas discontinuas e= 0,10 cm	m	11000,00	8,98	98726,76
Total presupuesto					Bs 609.619,92
Son: Seiscientos nueve mil seiscientos diecinueve 92/100 bolivianos					

Fuente: Elaboración Propia

Se obtiene un presupuesto total de mantenimiento de 609.619,92 bolivianos para su rehabilitación de las fallas encontradas en el tramo vial.

4.1.2. Análisis de resultados por el método IRI

Análisis Resultados del IRI por kilómetro del tramo vial

En la presente tabla nos muestra el IRI y su clasificación por kilómetro del tramo de estudio realizado mediante la rueda de merlín.

Tabla 58. Resultados del IRI por Kilometro

PROGRESIVAS		IRI (m/Km)	CLASIFICACION
Prog. inicial	Prog. final		
0+000	1+000	1,26	EXCELENTE
1+000	2+000	1,06	EXCELENTE
2+000	3+000	1,42	EXCELENTE
3+000	4+000	1,12	EXCELENTE
4+000	5+000	1,33	EXCELENTE
5+000	6+000	1,49	EXCELENTE
6+000	7+000	1,64	EXCELENTE
7+000	8+000	1,10	EXCELENTE
8+000	9+000	1,20	EXCELENTE
9+000	10+000	1,10	EXCELENTE
10+000	11+000	1,17	EXCELENTE

Fuente: Elaboración Propia

Como resultado de la evaluación por tramos de cada kilómetro, se determinó que el tramo Copacabana – Yunchará se encuentra en un rango de IRI clasificado como 'excelente', con valores comprendidos entre 0,0 y 2,0. Esta calificación refleja una calidad superior de la superficie, garantizando una conducción cómoda y segura.

Análisis Resultados del IRI para todo el proyecto

En la tabla se muestra el IRI de todo el proyecto el cual nos caracterizara al tramo vial Copacabana – Yunchará.

Tabla 59. Resultados IRI para todo el proyecto

PROGRESIVAS		IRI (m/Km)	CLASIFICACION
Prog. inicial	Prog. final		
0+000	11+000	1,26	EXCELENTE

Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del análisis completo del proyecto de estudio, se ha determinado que el IRI es de 1,26 m/km. Este valor indica que el tramo vial Copacabana - Yunchará se clasifica como "excelente" en términos de calidad de la superficie. Este índice refleja una superficie de rodadura muy uniforme y en óptimas condiciones, garantizando una experiencia de conducción suave y cómoda para los usuarios.

4.1.3. Análisis de resultados de la macrotextura

Resultados de la macrotextura para cada kilómetro de ida y vuelta

La presente tabla nos muestra la macrotextura del tramo de estudio separada en tramos de ida y vuelta, mediante el ensayo de la mancha de arena.

Tabla 60. Resultados de la macrotextura por cada kilómetro de ida y vuelta

Prog. Inicial	Prog. Final	MTD (mm) Ida	Clasificación Parcial	MTD (mm) Vuelta	Clasificación Parcial
0+000	1+000	0,81	gruesa	0,77	media
1+000	2+000	0,84	gruesa	0,78	media
2+000	3+000	0,83	gruesa	0,88	gruesa
3+000	4+000	0,75	media	0,79	media
4+000	5+000	0,72	media	0,90	gruesa
5+000	6+000	0,85	gruesa	0,72	media
6+000	7+000	0,73	media	0,73	media
7+000	8+000	0,81	gruesa	0,81	gruesa
8+000	9+000	0,77	media	0,77	media
9+000	10+000	0,63	media	0,65	media
10+000	11+000	0,61	media	0,71	media

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados ida y vuelta revelaron dos clasificaciones "gruesa" y "media". La macrotextura "gruesa" fue predominantemente observada en los primeros kilómetros, y la "media" fue más común en los tramos intermedios y finales del carril de ida. Para el carril de vuelta se percibe que en su mayoría tiene una clasificación de macrotextura "media".

Análisis de resultados de la macrotextura del tramo de ida y vuelta

Para determinar la macrotextura en el tramo de ida y vuelta se identifican las siguientes tablas:

Tabla 61. Resultados y clasificación de la macrotextura carril de ida

Prog. Inicial	Prog. Final	MTD (mm) Ida	Clasificación Parcial
0+000	11+000	0,76	media

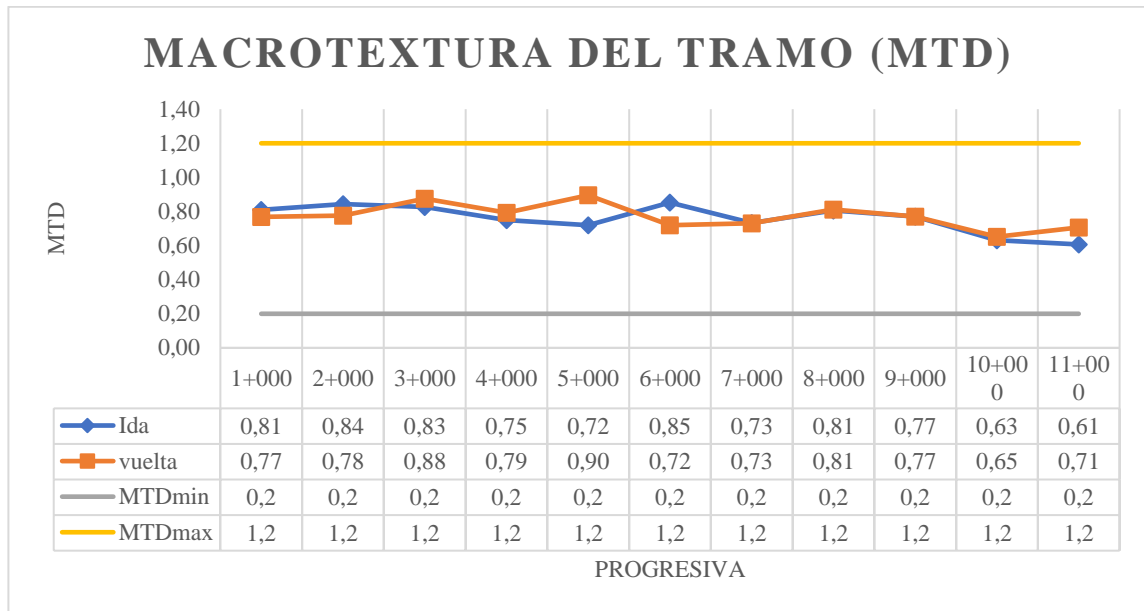
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 62. Resultados y clasificación de la macrotextura carril de vuelta

Prog. Inicial	Prog. Final	MTD (mm) Vuelta	Clasificación Parcial
11+000	0+000	0,77	media

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 19. Macrotextura del tramo



Fuente: Elaboración Propia

Observando el gráfico 19. el comportamiento de la macrotextura de ambos carriles se encuentra en clasificación “media” siendo superior a la MTD mín. e inferior a la MTD máx. teniendo un buen nivel de comportamiento en ambos carriles del tramo vial.

Resultados de la macrotextura de todo el proyecto

En la siguiente tabla se muestra el resultado de la macrotextura de todo el proyecto y la más importante.

Tabla 63. Resultados macrotextura para todo el proyecto

Prog. Inicial	Prog. Final	MTD (mm)	Clasificación Parcial
0+000	11+000	0,77	media

Fuente: Elaboración Propia

El análisis integral de la macrotextura para todo el proyecto indica que, con un valor promedio de 0,77 mm, la clasificación general es "media". Esto es aceptable para la circulación, ya que proporciona un nivel adecuado de fricción entre el neumático y la superficie, reduciendo el riesgo de deslizamiento sin causar un desgaste prematuro de los neumáticos.

4.1.4. Análisis de los resultados de la microtextura

Análisis de resultados de la microtextura para cada kilómetro ida y vuelta

La presente tabla nos muestra la microtextura del tramo de estudio separada en tramos de ida y vuelta, mediante el ensayo del péndulo británico.

Tabla 64. Resultados y clasificación de la microtextura por kilómetro ida y vuelta

Prog. Inicial	Prog. Final	RD (mm) Ida	Clasificación Parcial	RD (mm) Vuelta	Clasificación Parcial
0+000	1+000	0,83	de bueno a regular	0,92	malo
1+000	2+000	0,70	bueno	0,79	bueno
2+000	3+000	0,82	de bueno a regular	0,87	de bueno a regular
3+000	4+000	0,75	bueno	0,78	bueno
4+000	5+000	0,84	de bueno a regular	0,82	de bueno a regular
5+000	6+000	0,85	de bueno a regular	0,79	bueno
6+000	7+000	0,84	de bueno a regular	0,84	de bueno a regular
7+000	8+000	0,82	de bueno a regular	0,77	bueno
8+000	9+000	0,78	bueno	0,82	de bueno a regular
9+000	10+000	0,85	de bueno a regular	0,87	de bueno a regular
10+000	11+000	0,83	de bueno a regular	0,86	de bueno a regular

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados ida y vuelta revelaron tres clasificaciones “bueno”, “de bueno a regular” y “malo” se puede observar y clasifican la microtextura por cada tramo de 1 km de 22 tramos evaluados dentro de los cuales 14 tramos clasifican como “de bueno a regular” mientras que 7 tramos clasifican como “bueno” y un tramo siendo el más crítico y clasifica como “malo”.

Análisis de resultados de la microtextura del tramo ida y vuelta

Para determinar la microtextura en el tramo de ida y vuelta de identifican las siguientes tablas:

Tabla 65. Resultados y clasificación de la microtextura carril de ida

Prog. Inicial	Prog. Final	RD (mm) Ida	Clasificación Parcial
0+000	11+000	0,81	de bueno a regular

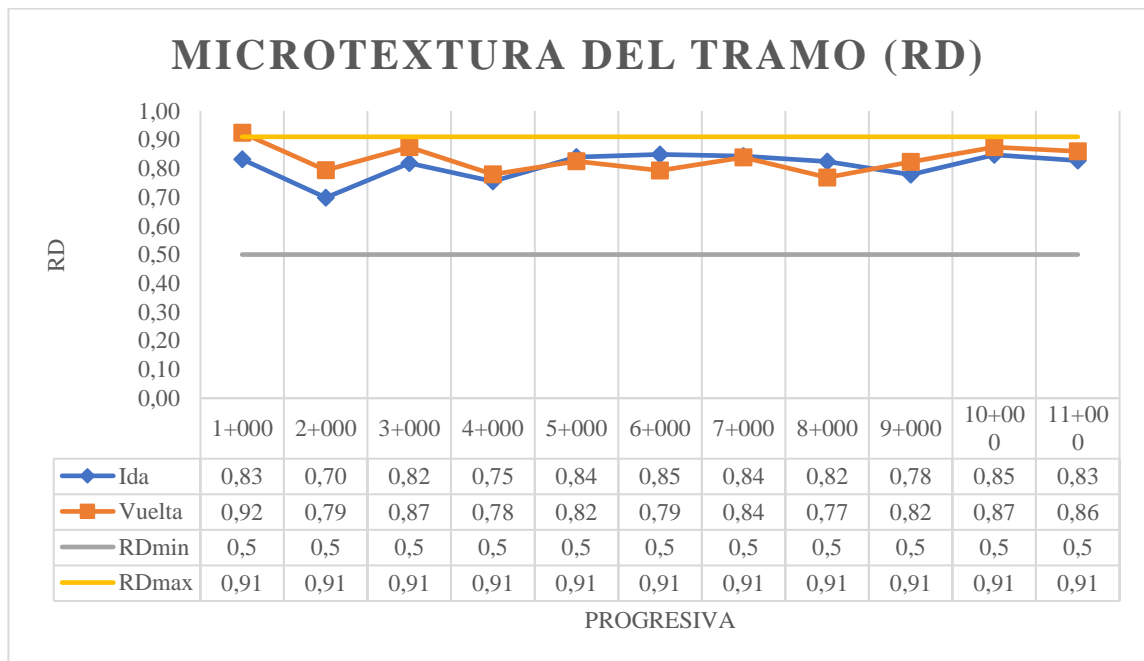
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 66. Resultados y clasificación de la microtextura carril de vuelta

Prog. Inicial	Prog. Final	RD (mm) Vuelta	Clasificación Parcial
11+000	0+000	0,83	de bueno a regular

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 20. Microtextura del tramo



Fuente: Elaboración Propia

Observando el gráfico 20. el comportamiento de la microtextura de ambos carriles se encuentra en clasificación “de bueno a regular” siendo superior a la RD mín. e inferior a la RD máx. en su totalidad, sin embargo, hay un único valor de RD que superan el RD máx. en la progresiva 1+000 con 0,92 teniendo un buen nivel de comportamiento en ambos carriles del tramo vial.

Análisis de resultados de la microtextura para todo el proyecto

La siguiente tabla nos muestra el resultado de la microtextura de todo el proyecto.

Tabla 67. Resultados y clasificación de la microtextura de todo el proyecto

Prog. Inicial	Prog. Final	RD (mm)	Clasificación Parcial
0+000	11+000	0,82	de bueno a regular

Fuente: Elaboración Propia

Como resultados de la microtextura del pavimento flexible del tramo Copacabana – Yunchará tiene una clasificación “de bueno a regular” el cual está dentro de los rangos permitidos de circulación existiendo adherencia entre neumático y pavimento y más aún en áreas mojadas, lo cual es aceptable, por que muestra seguridad al deslizamiento, encontrándose en un punto medio entre patinaje y desgaste de neumáticos.

4.1.5 Análisis de resultados del método IFI

Resultados del IFI para cada kilómetro del tramo de estudio entre los carriles de ida y vuelta son:

Tabla 68. Resultados del IFI por kilómetro del tramo de estudio

Progresiva inicial	Progresiva final	IFI. (Km/h)	
		IDA	VUELTA
0+000	1+000	93,63	100,42
1+000	2+000	81,16	84,06
2+000	3+000	93,47	105,92
3+000	4+000	77,73	85,43
4+000	5+000	85,43	102,04
5+000	6+000	95,22	81,66
6+000	7+000	84,45	83,97
7+000	8+000	93,79	89,00
8+000	9+000	83,67	87,52
9+000	10+000	70,88	75,80
10+000	11+000	70,54	77,71

Fuente: Elaboración Propia

Como resultados de IFI para tramo de estudio de observa en la tabla 68. los resultados de velocidades obteniendo la velocidad más alta de 105,92 km/h la cual se encuentra en el

kilómetro 2 a 3 tramo vuelta y la velocidad menor de 70,54 km/h ubicada en el kilómetro 10 a 11 tramo ida.

Análisis de resultados del IFI de todo el proyecto

En la siguiente tabla se muestra el IFI de todo el proyecto.

Tabla 69. Resultados del IFI para todo el proyecto

Progresiva inicial	Progresiva final	IFI (Km/h)
0+000	11+000	86,52

Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del proyecto de estudio nos dice que la velocidad máxima permitida para todo el tramo vial “Copacabana – Yunchará” es de 86,52 km/h para todo el tramo, no debiendo de exceder en ningún momento. La cual está por encima de 40 km/h para tránsito de una carretera provincial.

Verificación de las velocidades de circulación

Se realizó una previsualización inicial de la vía para establecer criterios de división en tramos donde la velocidad sería constante. Con el fin de obtener una mayor precisión en la medición de velocidades, se dividió el tramo vial en secciones, seleccionando puntos específicos con mejor visibilidad para realizar el aforo.

Para la verificación de velocidades, se realizó la medición del tiempo de circulación de vehículos con diferentes ejes en una distancia específica, tanto en carriles de ida como de vuelta para cada sección. Esto permitió determinar la velocidad real de los vehículos en el tramo Copacabana – Yunchará y compararla si está dentro de lo permitido según la velocidad máxima establecida por el método IFI.

Análisis de resultados de IFI vs velocidad real.

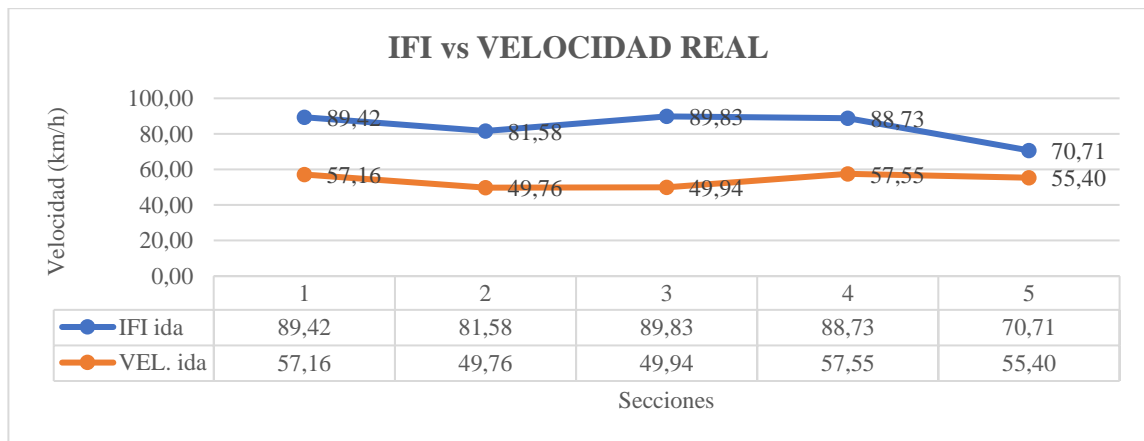
En la siguiente tabla se muestra las velocidades establecidas por el IFI y las velocidades aforadas en campo, tomando el promedio para el valor de la sección a comparar.

Tabla 70. Comparación de velocidades

SECCION	Progresiva inicial	Progresiva final	IFI	IFI	Velocidad	Velocidad
			Promedio (IDA)	Promedio (VUELTA)	Promedio (IDA)	Promedio (VUELTA)
			(Km/h)	(Km/h)	(Km/h)	(Km/h)
1	0+000	3+000	89,42	96,80	57,16	58,38
2	3+000	5+000	81,58	93,74	49,76	49,91
3	5+000	7+000	89,83	82,81	49,94	42,59
4	7+000	9+000	88,73	88,26	57,55	51,64
5	9+000	11+000	70,71	76,76	55,40	50,14

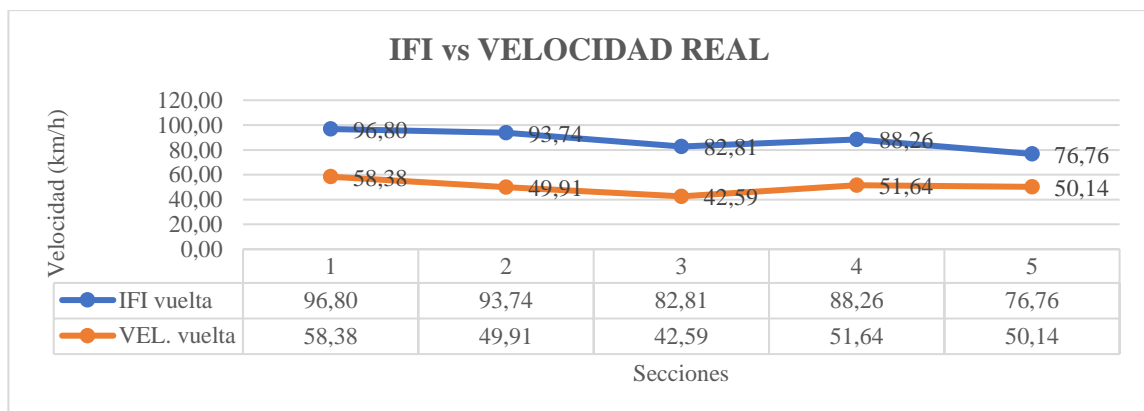
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 21. Comparación de IFI vs velocidad real carril de ida



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 22. Comparación IFI vs velocidad real carril de vuelta



Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en los gráficos anteriores, las velocidades establecidas por el IFI superan consistentemente a las velocidades reales registradas en ambos carriles, tanto en la ida como en la vuelta, a lo largo de todas las secciones analizadas. Este comportamiento indica que los vehículos están cumpliendo la velocidad máxima permitida, que es de 86,52 km/h para el proyecto establecida por el IFI en todo el tramo vial.

Al estar dentro de los límites de velocidad establecidos por el IFI, los conductores minimizan los riesgos asociados a excesos de velocidad, lo cual es fundamental para la prevención de accidentes y para asegurar un tránsito fluido y seguro a lo largo del trayecto.

4.2. Análisis de la evaluación estructural

4.2.1. Análisis de resultados por el método no destructivo con la viga Benkelman

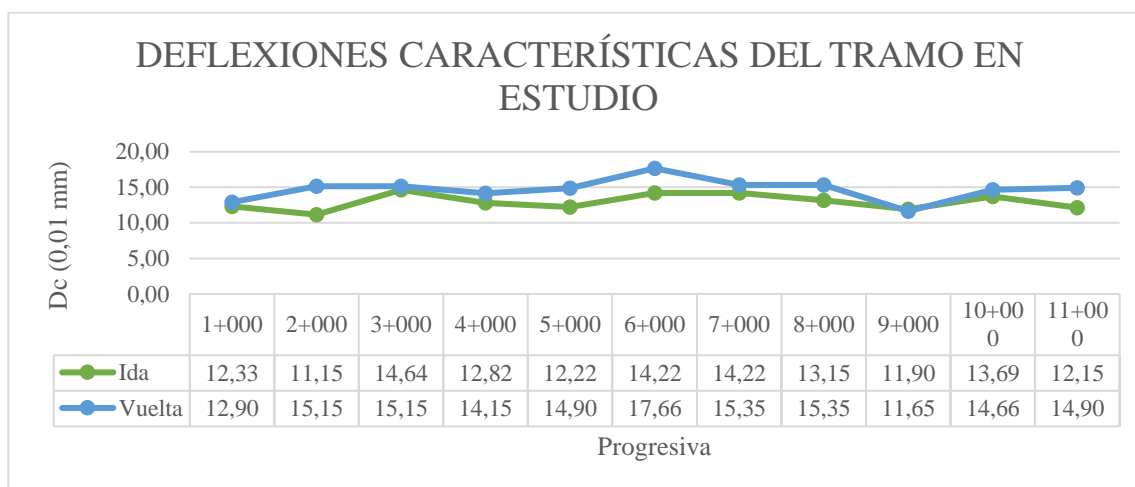
En la presente tabla nos muestra los resultados finales de deflexiones y radios de curvatura determinados con la viga Benkelman, para cada progresiva de los sentidos de ida y vuelta, en la cual se proporcionan los siguientes resultados.

Tabla 71. Resultados de la deflexión y radio de curvatura por kilómetro del tramo de estudio

PROGRESIVAS		Dc (0,01 mm)		RC (m)	
Prog. Inicial	Prog. Final	IDA	VUELTA	IDA	VUELTA
0+000	1+000	12,33	12,90	960,60	759,18
1+000	2+000	11,15	15,15	781,25	840,20
2+000	3+000	14,64	15,15	972,94	920,71
3+000	4+000	12,82	14,15	870,70	840,20
4+000	5+000	12,22	14,90	870,70	637,95
5+000	6+000	14,22	17,66	972,94	792,58
6+000	7+000	14,22	15,35	920,71	814,65
7+000	8+000	13,15	15,35	919,48	931,83
8+000	9+000	11,90	11,65	870,70	851,52
9+000	10+000	13,69	14,66	886,95	727,23
10+000	11+000	12,15	14,90	870,70	879,60

Fuente: Elaboración Propia.

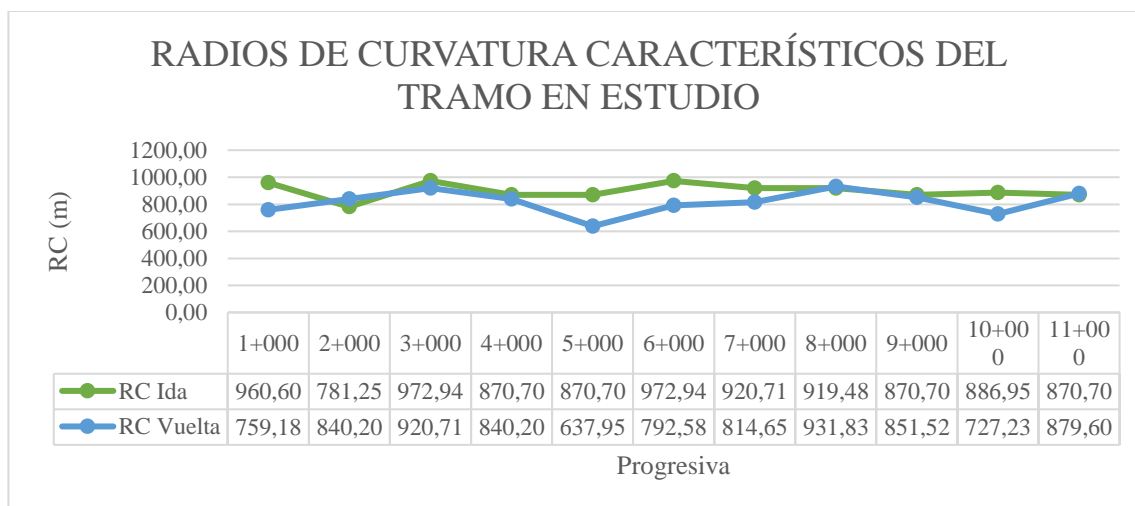
Gráfico 23. Deflexiones Características en el tramo de ida y vuelta



Fuente: Elaboración Propia

Se observa en el gráfico 23. las deflexiones características del carril de vuelta, son mayores al carril de ida, por lo tanto, existe mayor recuperabilidad o mayor deformación en el carril de vuelta.

Gráfico 24. Radios de curvatura del tramo de estudio



Fuente: Elaboración Propia

En los radios de curvatura características de ambos carriles se asemejan, sin embargo hay una tendencia que los radios de curvatura del carril de ida son mayores al carril de vuelta, sin embargo, todos los resultados del tramo superan al valor mínimo de 80 m (valor que expresa rigidez del paquete estructural, casi nula recuperación).

4.2. Hipótesis con distribución chi cuadrado

1. Interpretación de hipótesis

“Si, Al realizar la evaluación superficial y estructural del tramo "Copacabana - Yunchará", se determinara el estado del pavimento flexible”

La hipótesis de investigación contiene un verbo conector mayor que relaciona a un conector condicionante esta referido a (>; mayor que), indicando que relaciona más con la hipótesis alternativa

2. Significancia

nivel de confianza de la investigación: NC=95%

Nivel se significancia propuesto: $\alpha=5\%$

3. Calculo estadístico

		CLASIFICACIÓN				TOTAL
		REGULAR	BUENO	MUY BUENO	EXCELENTE	
SECCIONES	SECCIÓN 1	0	2	10	2	14
	SECCIÓN 2	1	1	4	8	14
	SECCIÓN 3	0	1	3	10	14
	TOTAL	1	4	17	20	42

Frecuencias teóricas Ft

$$\frac{1 * 14}{42} = 0,33 \text{ para } 0,1 \text{ y } 0$$

$$\frac{4 * 14}{42} = 1,33 \text{ para } 2,1 \text{ y } 1$$

$$\frac{17 * 14}{42} = 5,67 \text{ para } 10,4 \text{ y } 3$$

$$\frac{20 * 14}{42} = 6,67 \text{ para } 2,8 \text{ y } 10$$

Grado de libertad

$$n = (nfil - 1) * (ncol - 1)$$

$$n = (3 - 1) * (4 - 1)$$

$$n = 6$$

Chi cuadrado

$$X^2 = \sum \frac{(f - ft)^2}{ft}$$

$$X^2 = \frac{(0-0,33)^2}{0,33} + \frac{(1-0,33)^2}{0,33} + \frac{(0-0,33)^2}{0,33} + \frac{(2-1,33)^2}{1,33} + \frac{(1-1,33)^2}{1,33} + \frac{(1-1,33)^2}{1,33} + \frac{(10-5,67)^2}{5,67} + \frac{(4-5,67)^2}{5,67} + \frac{(3-5,67)^2}{5,67} + \frac{(2-6,67)^2}{6,67} + \frac{(8-6,67)^2}{6,67} + \frac{(10-6,67)^2}{6,67}$$

$$X^2 = 12,75$$

Mediante tabla de distribución chi cuadrado con grado de libertad n=6

$$X^2_{tabla} = 12,5916$$

$$X^2_{calculado} = 12,75$$

$X^2_{calculado} > X^2_{tabla}$ se rechaza la hipótesis nula

$X^2_{calculado} < X^2_{tabla}$ se rechaza la hipótesis alternativa

4. Comparación estadísticos

Entonces:

$$X^2_{calculado} = 12,75 > X^2_{tabla} = 12,5916 \text{ se rechaza la hipótesis nula}$$

5. Conclusión sobre la hipótesis

Decisión: Se rechaza la hipótesis nula (h_0), por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa (h_1). Esto quiere decir que la hipótesis planteada es aceptada.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Una vez finalizado el estudio del tramo “Copacabana – Yunchará” se llegó a las siguientes conclusiones.

- Se investigo y profundizo el conocimiento sobre los pavimentos su estructura característica comportamientos y evaluación de pavimentos flexibles.
- Se efectuaron satisfactoriamente las mediciones de campo para obtener los resultados de estado superficial y estructural del tramo en estudio.
- Se logro concretar con los objetivos propuestos, al realizar la evaluación superficial y estructural y la aplicación de los métodos citados.
- Se profundizo el análisis de los resultados calculados en gabinete de cada método aplicado, se calificó individualmente cada método y en partes de tramos ida y vuelta, secciones y proyecto general de estudio como se muestra en lo siguiente:
- El tramo Copacabana-Yunchará se encuentra en general en condiciones "muy buenas", con un PCI promedio de 84, lo que indica que el pavimento flexible está en buen estado y es seguro para la circulación vehicular.
- Mediante la aplicación del PCI, se determinó que las fallas predominantes son el desprendimiento de agregados, que constituye el 50% de las fallas observadas. la exudación, con un 24%, y las fisuras longitudinales y transversales con piel de cocodrilo, que representan el 9%. Estos resultados indican que el desgaste superficial y la pérdida de material son los problemas más críticos. Aunque estas fallas no representan un peligro inmediato, requieren atención para prevenir un deterioro mayor en el futuro.
- Haciendo un análisis de costos se puede verificar que el precio estimado de reparación y mantenimiento del tramo vial Copacabana – Yunchará es de 609.619,92 Bs (Seiscientos nueve mil seiscientos diecinueve con noventa y dos).
- Para el tramo de estudio, se obtiene un IRI promedio es de 1,26 m/km, que se encuentra dentro del rango de 0,0 a 2,0 y recibe una clasificación de "excelente".

Esto confirma la uniformidad de la superficie, asegurando una conducción suave y un transporte eficiente de la carga.

- La macrotextura del pavimento, con un promedio de 0,77 mm, está clasificada como "media", lo que asegura una fricción adecuada entre el neumático y la superficie. La textura del tramo de ida y vuelta varía entre "gruesa" y "media", indicando que el pavimento está en buenas condiciones y contribuye a la seguridad de la vía.
- La microtextura del pavimento se encuentra entre “bueno a regular”, con un valor promedio de 0,82 mm en todo el proyecto. Esto indica un nivel adecuado de seguridad contra el deslizamiento, situándose en un punto intermedio entre patinaje y desgaste de neumáticos. Esta condición es aceptable para la circulación y garantiza seguridad en condiciones de humedad.
- El IFI promedio del tramo en estudio es de 86,52 km/h, Esto indica que la velocidad máxima permitida para la seguridad del tramo no debe exceder este valor.
- Las velocidades reales registradas se mantienen consistentemente por debajo del límite establecido, lo que asegura un tránsito seguro en el tramo. Esto refleja un comportamiento adecuado de los conductores en relación con las condiciones de la vía y contribuye a una menor incidencia de accidentes.
- En la evaluación estructural, se concluye que las deflexiones máximas características no superan la deflexión máxima admisible y los radios de curvatura son mayores a 100 metros. Por lo tanto, los datos son aceptables y las deformaciones observadas no son significativas. Según los resultados de la evaluación, el pavimento flexible se encuentra en buenas condiciones estructurales y tiene la capacidad suficiente para seguir soportando las cargas de tránsito solicitadas.
- En conclusión, el tramo "Copacabana – Yunchará" se encuentra actualmente en excelentes condiciones. El pavimento no requiere rehabilitación, pero sí es necesario llevar a cabo un mantenimiento.

5.2. Recomendaciones

Las recomendaciones para el siguiente trabajo final son:

- Contar con todos los equipos necesarios de seguridad para realizar la evaluación como ser triángulos, conos, chalecos fosforescentes, etc. al ser mayormente carreteras transitadas y con diferentes radios de curvaturas evitando la visibilidad del conductor se trasladan a grandes velocidades.
- Para la evaluación superficial depende mucho de la capacidad del evaluador, ya que para realizar una evaluación efectiva debe tener conocimiento y presencia del manual de fallas en todo momento del trabajo en campo.
- Se recomienda llevar a cabo un mantenimiento preventivo periódico para evitar el aumento en la severidad de las fallas observadas. Este mantenimiento debe centrarse en corregir problemas de meteorización y exudación, así como en reparar grietas y fisuras para prevenir la penetración de agua y el consiguiente deterioro de la estructura.
- Continuar con el monitoreo regular del tramo para identificar de manera oportuna el desarrollo de nuevas fallas y evaluar la efectividad de las intervenciones realizadas.
- A pesar de que las velocidades reales están dentro de los límites permitidos, es recomendable mantener y reforzar la señalización y campañas de concientización sobre la importancia de respetar los límites de velocidad.
- El trabajo de investigación presente es un aporte para que se tome medidas de mantenimiento periódico en el tramo evaluado y así poder prolongar su vida útil.