

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las vías representan un importante medio de desarrollo y crecimiento para un país, debido a que permiten la comunicación entre poblaciones y el acarreo de productos a la ciudad. Con el pasar del tiempo la demanda de los caminos aumenta, por lo cual estos deben estar en buen estado evitando su deterioro y conservarlas en buen estado es un trabajo arduo con el objetivo de brindar seguridad y una vía en buen estado para los usuarios.

Debido al alto costo que conlleva realizar la construcción de una carretera, y a la falta de recursos económicos en el país, de hace necesario realizar una evaluación superficial y estructural oportuna, con el fin de realizar un mantenimiento adecuado, evitando que el daño en el paquete estructural o en la capa de rodadura sea mayor generando gastos mayores, y así poder garantizar la transitabilidad durante todo el año.

Las fallas que afectan al pavimento se producen por múltiples factores como ser el resultado de un mal diseño del paquete estructural, de la mala calidad de los materiales, de errores constructivos, de un deficiente sistema de drenaje en caso de precipitaciones, del efecto de solicitaciones externas como carga vehicular y agentes climáticos, entre otros. Todo esto hace que se vea necesario una prevención y mantenimiento vial es una actividad de gran utilidad para el buen funcionamiento y así conocer el estado de deterioro, es un componente vital en el sistema de mantenimiento de pavimentos.

Una de las etapas iniciales y fundamentales para establecer las condiciones actuales del pavimento es la evaluación de fallas que se efectuará sobre la vía san Lorencito – Iscayachi en la ciudad de Tarija. Para el presente trabajo se realizará una identificación y valoración de las fallas en dicha vía, apoyándose en la metodología PCI (Índice de Condición del Pavimento) , la metodología IRI (Índice de Rugosidad Internacional) y la metodología PSI (Índice de Serviciabilidad Presente) estos para una evaluación superficial; posteriormente, la evaluación estructural se basará en la metodología Viga Benkelman por lo cual se ha decidido aplicar los métodos más usados para la evaluación superficial y estructural en esta tramo.

La evaluación superficial y estructural tienen como finalidad el análisis y estimación del valor estructural remanente, asimismo esta evaluación debe proporcionar la información necesaria para el diagnóstico de las fallas observadas con la finalidad de definir acciones de mantenimiento o rehabilitación más adecuada. que deberían ser resueltos lo más pronto posible antes que los daños sean irreparables, tanto así que se tendría que realizar un recapado de toda la estructura.

1.2 Situación problemática

Actualmente la carretera es la más eficiente y económica forma de traslado de productos como también de personas, por lo que el funcionamiento de éste debe ser óptimo.

El nivel mantenimiento de nuestras vías en nuestro país es muy bajo en comparación con otros países, por lo que la falta de recursos económicos está muy ligada al funcionamiento de las vías pavimentadas como no pavimentadas.

Actualmente en el departamento de Tarija viene dándose muchos problemas en las vías pavimentadas por lo que es necesario realizar un estudio de evaluación para determinar las condiciones que estas presentan para su uso.

EL mayor problema que se presenta en la vía San Lorencito – cruce Iscayachi es el deterioro que esta presenta a lo largo de su longitud, que afectan de manera directa a la circulación vehicular de la población que usa este medio, tanto los habitantes de la zona como también a los transportistas que su principal actividad es la del traslado de productos alimenticios y con el aumento de la demanda, el número de vehículos se incrementa y esto nos impulsa a realizar el proyecto de aplicación del estado de la superficie y de la estructura del pavimento.

Estos deterioros llegan a producirse por diferentes tipos de efectos desfavorables sobre la vía, por lo que su control y conservación oportuna resulta útil de modo que se pueda implementar y planificar políticas de mantenimiento y reparación adecuadas.

1.2.1 Problema

¿Cómo obtener información del estado actual de la carpeta asfáltica en el tramo San Lorencito – cruce Iscayachi?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

En la actualidad se ve necesario el mantenimiento en caminos, por lo tanto, es importante buscar alternativas para realizar dicha ejecución, el cual se tendrá escasa información en cuanto a datos técnicos de la zona. Las actividades a realizar en la conservación de la vía serán proporcionadas por datos de campo. Por lo cual podemos inferir que el estudio será factible y viable ya que se dará en un corto plazo.

1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema

Esta investigación es necesaria para las instituciones encargadas de la administración vial y centro de investigaciones universitarias que utilicen esta información para la aplicación del método para la verificación seguimiento y monitoreo del mantenimiento de caminos por Nivel de Servicio y la importancia que tiene esta vía.

1.3 Justificación

Mediante una inspección en el lugar pude evidenciar la existencia de los problemas que tiene en la vía en ambos carriles, el cual se pudo observar el deterioro de la carpeta asfáltica en un tiempo relativamente corto con respecto a su vida útil con la que fue diseñada, en el transcurso del recorrido se encuentra con la mayor parte de la carpeta deteriorada desde el cruce Iscayachi hasta San Lorencito se pudo ver problemas constructivos que me llamaron mucho la atención a sí mismo hablando con los comunarios me hicieron conocer sus preocupaciones, todos ellos llegaban a un mismo problema en común que este tramo a pocos días de ser inaugurado ya presentaba problemas y que como esta vía desde hace años ya no pertenece a la red nacional la ABC (Agencia Nacional de Caminos) ya no se hace cargo de los mantenimientos y que ahora pertenece a una red departamental, y que los del SEDECA (Servicio Departamental de Caminos) tampoco se quieren hacer cargo de esta vía al decir que no pertenece a su gestión y no realizan una evaluación ni un mantenimiento a la misma hace bastante tiempo dejándola en el olvido. Lo que se desea realizar es una prevención y que este deterioro no continúe avanzando, dando así una solución lo más antes posible, para así evitar un recapamiento total y no solamente un mantenimiento rutinario.

Así que me parece un tramo muy importante para poder hacer una evaluación superficial y estructural con métodos no destructivos que nos permitirá determinar los daños existentes en este, así como las causas de origen. Asimismo, establecer un diagnóstico que permita seleccionar y proyectar la solución de mantenimiento o rehabilitación más adecuada.

1.4 Objetivos

Los objetivos general y específico son:

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la vía cruce Iscayachi - San Lorencito de manera superficial y estructuralmente, a través de los métodos PCI, PSI, IRI, IFI y Viga Benkelman, para determinar las condiciones de servicio actual del pavimento.

1.4.2 Objetivos específicos

- Aplicar el método P.C.I., para describir las patologías encontradas en el tramo Iscayachi – San Lorencito.
- Realizar las mediciones correspondientes con el rugosímetro de Merlín, para determinar el I.R.I.
- Aplicar los resultados del I.R.I. en fórmulas para la determinación del P.S.I.
- Realizar levantamiento de información con el péndulo británico y la mancha de arena, para determinar la microtextura, macrotextura y el I.F.I. del tramo en estudio.
- Medir las deflexiones del pavimento del tramo empleando la viga Benkelman, para determinar deflexiones y radios de curvatura característicos.
- Identificar las causas que generan los deterioros en el pavimento, y proponer soluciones para mejorar la vida útil de tramo en estudio.

1.5 Hipótesis

Si, se realiza la evaluación superficial y estructural se podrá determinar el estado actual del pavimento en el tramo San Lorencito -cruce Iscayachi.

1.6. Operacionalización de las variables

El presente trabajo al tratarse de una evaluación, sólo se analiza la variable independiente:

1.6.1. Variable independiente

Variable independiente = El estado del pavimento flexible.

Tabla 1.1. Operacionalización de la variable independiente

Variable Independiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
El estado del pavimento flexible.	Determinar el estado actual y conservar las condiciones físicas de los diferentes elementos de un camino y de esta manera garantizar que el transporte sea cómodo seguro y económico.	Determinar	-	Determinar el estado actual del pavimento en el tramo.

Fuente: Elaboración propia

1.7. Identificación del tipo de investigación

El presente trabajo de evaluación es de carácter descriptivo.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

La unidad de estudio, población y muestra son:

1.8.1. Unidad de estudio

La unidad de estudio son los pavimentos en servicio.

1.8.2. Población

La población son los pavimentos que superaron la vida útil.

1.8.3. Muestra

La muestra de estudio es el tramo vial San Lorencito - cruce Iscayachi.

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, para cada kilómetro, cada 250 m. 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

Los métodos y técnicas empleadas son:

1.9.1. Métodos

Teóricos (análisis e síntesis) o empíricos (evaluaciones en laboratorio)

1.9.2. Técnicas

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

PCI (Pavement Condition Index):

Figura 1.1. Cinta métrica de 50 m y flexómetro



Fuente: Google imágenes.

IRI (international roughness index):

Figura 1.2. Rugosímetro de Merlín



Fuente: Elaboración propia.

IFI (índice de fricción internacional):

Figura 1.3. Péndulo británico y equipo de círculo de arena



Fuente: Elaboración propia.

Viga Benkelman:

Figura 1.4. Deflectómetro Benkelman



Fuente: Elaboración propia.

Extracción de núcleos:

Figura 1.5. Extractor de núcleos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1.6. Equipo de Marshall



Fuente: Elaboración propia.

1.10. Procesamiento de la información

Se procedió a una revisión de la información registrada en las planillas para analizarlo e interpretarlo.

Las muestras extraídas fueron tabuladas, así como también los resultados obtenidos de los ensayos en campo, se utilizaron los formatos establecidos por la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

1.11 Alcance del estudio de aplicación

El alcance del presente proyecto de aplicación es la evaluación del estado actual de la vía San Lorencito – Cruce Iscayachi para este estudio, el trabajo se dividirá en dos partes que son: evaluación superficial y evaluación estructural.

Antes de realizar las distintas evaluaciones se realizó una inspección visual general de toda la vía, para poder el deterioro presente tanto en la superficie como en la estructura de la carretera y con esto poder realizar los distintos ensayos sobre estos 11 km. de vía.

CAPÍTULO II
EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS

CAPÍTULO II

EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS

2.1. Estado del pavimento

Actualmente el pavimento de la vía San Lorencito cruce Iscayachi, cuenta con diferentes deficiencias a lo largo de su construcción, debido al paso del tiempo como ser: grietas longitudinales, grietas transversales, piel de cocodrilo, baches, ahuellamientos, hundimientos en su calzada, desprendimiento de la capa de rodadura a lo largo de la vía, y si no se toma acción inmediata, el deterioro puede llegar a ser tan grande, que presentaría un peligro para el tránsito vehicular, y esta a su vez se puede traducir en lamentables consecuencias, por ser una vía de gran tránsito.

Cabe recalcar que esta vía no cuenta con una señalización apropiada para el nivel de tránsito que proporciona, lo cual es un factor importante para el buen mantenimiento de la vía.

Teniendo en cuenta estos aspectos, vemos la necesidad que tiene esta vía de una evaluación tanto superficial como estructural, para sí poder tomar una acción inmediata y así evitar gastos mayores a largo plazo, siendo importante tomar en cuenta que esta vía tiene algunas reparaciones parciales a lo largo de su perfil longitudinal como ser; parcheo, sellado de fisuras tanto longitudinales como transversales.

2.2. Antecedentes

La vía San Lorencito, fue terminada de construir el año 2009, y esta nunca contó con una evaluación estructural, aunque si tiene realizada distintos tipos de reparaciones en varios tramos de la vía, tanto superficial como estructural y a su vez carece de señalizaciones, debido al tiempo que tiene la vía construida como tal.

Es posible determinar el espesor inicial de la capa de rodadura de asfalto, haciendo uso del expediente técnico sobre la construcción de dicho pavimento que nos proporcionó el servicio departamental de caminos.

2.3. Definición de pavimentos

Se define a los pavimentos como una estructura construida sobre la sub rasante de la vía, para resistir y distribuir los esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Por lo general está conformada por las siguientes capas: base, sub base y carpeta de rodadura.

Según AASHTO (1993) existen dos puntos de vista para definir un pavimento: el de la ingeniería y el del usuario.

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

Desde el punto de vista del usuario, el pavimento es una superficie que debe brindar comodidad y seguridad cuando se transite sobre ella, es decir debe proporcionar un servicio de calidad óptimo.

El paquete estructural que contiene un pavimento es:

Figura 2.1. Capas de un pavimento flexible



Fuente: www.civilneting.com

2.4. Características de un pavimento

Un pavimento debe cumplir adecuadamente sus funciones, debe reunir exigencias tales como; resistir la acción de las cargas impuestas por el tránsito, resistir ante los agentes del intemperismo, presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de

circulación de los vehículos, debe ser durable, debe presentar adecuadas condiciones de drenaje, debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos y ofrecer adecuada seguridad al tránsito. (Pavimentos, división de investigación y asesorías, universidad de Medellín, 1997)

2.5. Componentes de un pavimento flexible

2.5.1. Capa subrasante

Se denomina subrasante al suelo preparado y compactado que actúa como fundación para el paquete estructural de un pavimento. En la sección transversal es un punto cuya diferencia de cota con la rasante está determinada por el espesor del paquete estructural, dicho desnivel establecerá la necesidad de modificar el perfil natural del terreno, en algunos casos deben elevarse o rebajarse dichas cotas, en el primer caso se requerirá de un corte o excavación y en el segundo de un relleno.

Desde la década de los 50, se puso más énfasis en las propiedades fundamentales de la sub rasante y se idearon ensayos para caracterizar mejor a estos suelos. Ensayos usando cargas estáticas o de baja velocidad de deformación tales como el CBR, compresión simple, son reemplazados por ensayos dinámicos y de repetición de cargas, tales como el ensayo de módulo resiliente, que representan mucho mejor que sucede bajo un pavimento en lo concerniente a tensiones y deformaciones.

Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías:

Propiedades físicas: Son usadas para selección de materiales, especificaciones constructivas y control de calidad.

Propiedades ingenieriles: Dan una estimación de la calidad de los materiales para caminos. La calidad de los suelos para subrasantes se puede relacionar con el módulo resiliente, el módulo de Poisson, el valor del suelo y el módulo de reacción de la subrasante. Si el terreno de fundación es pésimo, debe desecharse el material que lo compone siempre que sea posible, y sustituirse este por un suelo de mejor calidad. Si el terreno de fundación es malo, habrá que colocar una subbase de material seleccionado antes de colocar la base, si el terreno de fundación es regular o bueno, podría prescindirse de la subbase.

Propiedades iniciales de los suelos

Las propiedades iniciales de los suelos son uno de los datos más importantes de diseño de un pavimento. Estas propiedades estarán siempre presentes, aunque cambien mediante tratamientos especiales tales como la estabilización, compactación, etc.

Para conocer las propiedades es necesario un muestreo muy amplio que abarque toda la traza del proyecto. Las probetas se llevan al laboratorio para ser ensayadas (granulometría, humedad, límites de Atterberg, contenido de humedad óptimo, CBR y clasificación). Todos estos datos se vuelcan en el perfil edafológico donde se indican los distintos tipos de suelo y su profundidad. También se confecciona una planilla que, junto al perfil edafológico, constituyen una herramienta fundamental para el inicio del proyecto.

2.5.2. Capa subbase

La capa sub base es una capa de material seleccionado que se coloca sobre la subrasante o nivel de cimentación de la estructura vial. La necesidad de colocar una capa de subbase está orientada por las siguientes reglas.

Disminuir el espesor de base que requiera un diseño, reemplazando parte del material de base por uno de inferiores características, el cual viene a formar la capa de subbase con un menor costo.

Servir de refuerzo o defensa a la subrasante impidiendo su deterioro, especialmente cuando esta vaya a estar sometida a la acción del tráfico por un periodo más o menos largo. Puede emplearse, además, para mejorar las condiciones de drenaje de la base y también para impedir que la base sea afectada por la plasticidad, elasticidad y cambios volumétricos de los suelos subrasantes. El material de la subbase, debe ser seleccionado y tener mayor capacidad de soporte que el terreno de fundación compactado. Este material puede ser: arena, grava, granzón, escoria de los altos hornos, o estériles de la explotación de canteras. En algunos casos, es posible emplear para subbase el material de la subrasante mezclado con granzón, cemento, etc.

Controlar la ascensión capilar del agua proveniente de las napas freáticas cercanas o de otras fuentes, protegiendo así el pavimento contra los hinchamientos que se producen en épocas de helada. Este hinchamiento es causado por el congelamiento del agua capilar,

fenómeno que se observa especialmente en suelos limosos, donde la ascensión del agua capilar es grande.

Características de la capa subbase

El material ha de tener las características de un suelo A1 o A2, aproximadamente. Su límite líquido debe ser inferior a 35% y su índice plástico no mayor de 6. El CBR, no podrá bajar de 20%. Si la función principal de la subbase es servir de capa de drenaje, el material a emplearse debe ser granular, y la cantidad de material fino (limo y arcilla) que pase el tamiz número 200 no ha de ser mayor del 8%.

Tabla 2.1. Requisitos para subbase granular

Ensayo	Requisitos
CBR, mínimo.	20
Valor R de resistencia, mínimo.	55
Límite líquido.	25
Índice de plasticidad, máximo.	06
Equivalente de arena, mínimo.	25

Fuente: Mecánica de materiales para pavimentos (Sanfadila).

Las subbases deben construirse en espesores adecuados al tipo de material disponible y a los compactadores utilizados, pero se recomienda no exceder capas de más de 20 cm. sueltos. Por lo general se exigen compactaciones del 95 del Proctor modificado. (Pavimentos, división de investigación y asesorías, universidad de Medellín, 1997, características de capa base)

2.5.3. Capa base

Es una capa de material seleccionado y gradado que se coloca ya sea en una subrasante de muy alta especificación o sobre una capa de subbase. Los objetivos de esta capa son: absorber los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos y, además, repartir uniformemente estos esfuerzos a la subbase y al terreno de fundación. Las bases pueden ser granulares, o bien estar formadas por mezclas bituminosas o mezclas estabilizadas con cemento u otro material ligante.

Características de la capa base

El material pétreo que se emplee en la base, deberá llenar los siguientes requisitos:

Ser resistente a los cambios de humedad y temperatura y no presentar cambios de volumen que sean perjudiciales, el porcentaje de desgaste, según el ensayo “desgaste de los Ángeles”, debe ser inferior a 50.

La fracción del material que pase el tamiz No. 40, ha de tener un límite líquido menor del 25%, y un índice de plasticidad inferior a 6, la fracción que pasa el tamiz No. 200, no podrá exceder de $\frac{1}{2}$, y en ningún caso de los $\frac{2}{3}$ de la fracción que pase el tamiz No. 40.

La graduación del material de la base debe mantenerse dentro de los límites indicados.

El CBR tiene que ser superior a 20%, prueba de solidez al sulfato de sodio no mayor al 12%, por lo general, para la capa base se emplea piedra triturada, grava o mezclas estabilizadas de suelo-cemento, suelo bituminoso, etc.

Tabla 2.2. Requisito para base granular

Ensayo	Transito reducido	Transito regular e intenso
CBR, mínimo.	20	50
Valor R de resistencia, mínimo.	78	80
Límite líquido.	25	25
Índice de plasticidad, máximo.	06	03
Equivalente de arena, mínimo.	30	50

Fuente: Mecánica de materiales para pavimentos (Sanfadila).

2.5.4. Carpeta asfáltica

La carpeta asfáltica es una de las capas que componen el paquete estructural, está situada sobre una o más capas estructurales preparadas, está elaborada con material pétreo y un producto asfáltico, el espesor de esta capa puede variar desde menos de 25 mm hasta más de 75 mm dependiendo de una gran variedad de factores y circunstancias de diseño, construcción y mantenimiento.

Su función primordial será proveer al usuario de una superficie confortable y segura para su circulación, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática, además de proteger la base impermeabilizando la superficie, para evitar así posibles infiltraciones del agua de lluvia que podría saturar total o parcialmente las capas inferiores,

degradando sus propiedades. Además, evita que se desgaste o se desintegre la base a causa del tránsito de los vehículos.

Una de las principales ventajas de los pavimentos asfálticos es la economía asegurada por el uso de materiales disponibles localmente.

Tipos de carpetas asfálticas

Existen varios tipos de carpetas utilizadas en nuestro medio, pueden clasificarse de la siguiente manera:

Tratamiento superficial: simple o de un riego, doble o de dos riegos y triple o de tres riegos.

Tratamiento superficial triple

El tratamiento superficial triple consiste en un tratamiento superficial simple con cantidades de asfalto y agregado pétreo en mayor cantidad que uno normal, sobre el cual se aplica un tratamiento superficial doble, quedando así terminada la carpeta de tres riegos. Este tipo de tratamiento puede resistir un tráfico de 1000 vehículos por día y que, a comparación del tratamiento superficial simple, solo puede soportar un tráfico inferior a los 200 vehículos por día y el tratamiento superficial doble llega a soportar 600 vehículos por día. (<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/10577/capitulo7.pdf>)

2.6. Fallas en pavimentos flexibles

Las fallas son el resultado de interacciones complejas de diseño, materiales, construcción, tránsito vehicular y medio ambiente, situación que se agrava, al no darle un mantenimiento adecuado a la vía.

En pavimentos la palabra falla se utiliza tanto para verdaderos colapsos, como para deterioros simples, el concepto de deterioro o falla está asociado al nivel de servicio que depende de la exigencia del consumidor, una falla es algo que aparta de lo que se considera perfecto.

Existen dos tipos de fallas: estructurales y fallas de superficie.

2.6.1. Fallas estructurales

Son las que originan un deterioro en el paquete estructural del pavimento, disminuyendo la cohesión de las capas y afectando su comportamiento frente a cargas externas.

Comprende los defectos de la superficie de rodamiento, cuyo origen es una falla en la estructura del pavimento, es decir, de una o más capas constitutivas que deben resistir el complejo juego de sollicitaciones que imponen el tránsito y el conjunto de factores climáticos.

Para corregir este tipo de fallas, es necesario un refuerzo sobre el pavimento existente, para que el paquete estructural responda a las exigencias del tránsito presente y futuro estimado.

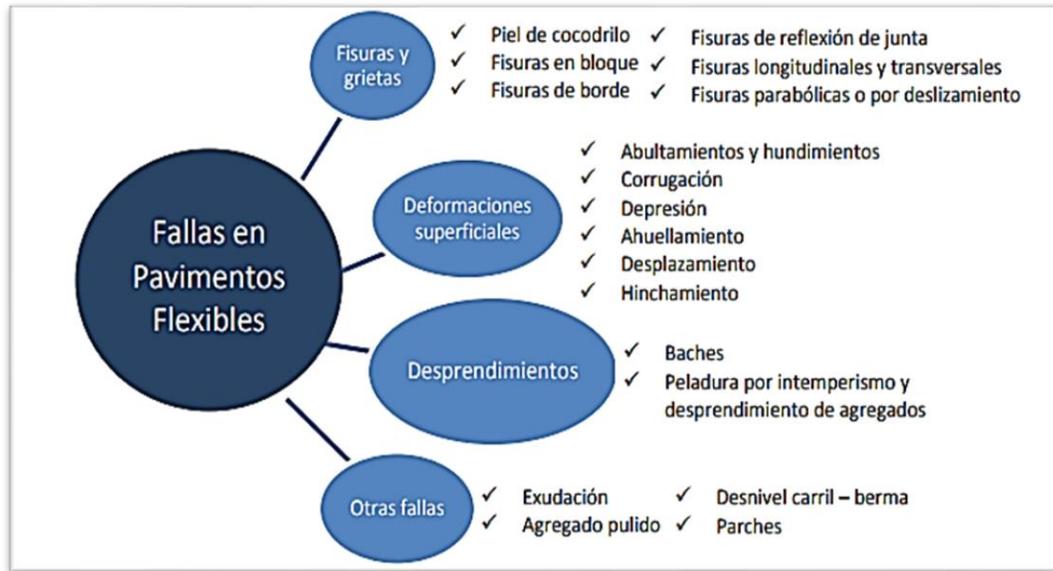
2.6.2. Fallas superficiales

Las fallas funcionales, en cambio, afectan la transitabilidad, es decir, la calidad aceptable de la superficie de rodadura, la estética de la pista y la seguridad que brinda al usuario.

La corrección de estas fallas se efectúa con solo regularizar su superficie y conferirle la necesaria impermeabilidad y rugosidad.

Las fallas de superficie se pueden jerarquizar de acuerdo con la prioridad de la reparación y con su efecto sobre la comodidad y seguridad para el usuario y sobre el estado del pavimento, lo cual permite planificar los recursos y las soluciones. Para pavimentos flexibles, los daños pueden ser agrupados en 4 categorías: fisuras y grietas, deformaciones superficiales, desintegración de pavimento o desprendimientos y afloramientos y otras fallas. En el manual del “Método de evaluación de pavimentos PCI” existen 19 tipos de falla comúnmente encontrados en pavimentos que son los siguientes.

Figura 2.2. Resumen de fallas en pavimentos flexibles



Fuente: pirhua.udep.edu.pe.

Las fallas en los pavimentos informan sobre su condición y las causas posibles de la misma. El inventario de los daños de un pavimento representa una información fundamental en el proceso de la evaluación del estado del pavimento.

2.7. Evaluación de pavimentos

Los pavimentos son estructuras diseñadas para entregar al usuario seguridad y comodidad al conducir, esto significa que el camino debe entregar un nivel de servicio acorde a la demanda solicitada.

La evaluación de pavimentos consiste en un informe, en el cual se presenta el estado en el que se 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 una evaluación que sea objetiva y acorde al medio en que se encuentre.

2.7.1. Importancia de la evaluación de pavimentos

La evaluación de pavimentos es importante, pues esta nos permitirá conocer a tiempo los deterioros presentes en la superficie, y de esta manera realizar las correcciones, consiguiendo con ello brindar al usuario una serviciabilidad óptima.

Con la realización de una evaluación periódica del pavimento, se podrá predecir el nivel de vida de una red o un proyecto.

La evaluación de pavimentos, también permitirá optimizar los costos de rehabilitación, pues si se trata de un deterioro de forma temprana se prolonga su vida de servicio ahorrando de esta manera gastos mayores o innecesarios.

2.7.2. Componentes de la evaluación de pavimentos

La evaluación de pavimentos tiene dos componentes como ser: evaluación superficial y evaluación estructural.

Evaluación superficial

Con la evaluación superficial se busca reflejar el estado del pavimento a través de sus características superficiales, presentes en el momento de la evaluación.

Evaluación estructural

A través de la evaluación estructural se obtienen respuestas sobre el comportamiento del pavimento como estructura, sometida a las solicitaciones impuestas por las cargas generadas por el tráfico de vehículos y la acción de los agentes ambientales, como la temperatura, humedad, etc.

Esos dos componentes se complementan mutuamente, para permitir la obtención de resultados, aplicables a la planificación de obras de mantenimiento, proyectos de mejoramiento, elección de técnicas de reparación, control de calidad de mantenimiento y verificación de la capacidad portante de la estructura. (Cálculo del índice de condición de pavimento flexible en la av. Luis Montero, distrito de Castilla, Edgar Daniel Rodríguez Velásquez, octubre 2009, pág. 11).

2.8. Evaluación superficial de pavimentos flexibles

2.8.1. Índice de condición del pavimento (PCI)

El Índice de Condición del Pavimento (PCI), fue desarrollado entre los años 1974 a 1976 por el Cuerpo de Ingeniería de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos y ejecutado por los Ingenieros Srs. Mohamed Y. Shahin, Michael L. Darter y Starr D. Kohn, con el objeto de obtener un sistema de administración del mantenimiento de pavimentos rígidos y flexibles a través del PCI.

Este método constituye el modo más completo para la evaluación y calificación objetiva de pavimentos, como procedimiento estandarizado, por agencias como, por ejemplo: el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, el APWA (American Public Work Association) y ha sido publicado por la ASTM como método de análisis y aplicación (procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en caminos y estacionamientos ASTM D6433-03).

El cálculo del PCI se fundamenta en los resultados de un inventario visual del estado del pavimento en el cual se establecen clase, severidad y cantidad de cada falla presente. Dada la gran cantidad de combinaciones posibles, el método introduce un factor de ponderación, llamado “valor deducido”, para indicar en qué grado afecta a la condición del pavimento cada combinación de deterioro, nivel de severidad y densidad (cantidad).

El PCI se desarrolló para obtener un índice de la integridad estructural del pavimento y de la condición operacional de la superficie, un valor que cuantifique el estado en que se encuentra el pavimento para su respectivo tratamiento y mantenimiento.

Los objetivos que se esperan con la aplicación del método PCI son:

Determinar el estado en que se encuentra el pavimento en términos de su integridad estructural y del nivel de servicio que ofrece al usuario. El método permite la cuantificación de la integridad estructural de manera indirecta, a través del índice de condición del pavimento (ya que no se realizan mediciones que permiten calcular directamente esta integridad).

Cuando se habla de integridad estructural, se hace referencia a la capacidad que tiene el paquete estructural de soportar solicitaciones externas, como cargas de tránsito o

condiciones ambientales. En cambio, el nivel de servicio es la capacidad del pavimento para brindar un uso confortable y seguro al conductor.

Obtener un buen indicador que permita comparar, con un criterio uniforme la condición y comportamiento del pavimento y de esta manera justificar la programación de obras de mantenimiento y rehabilitación, seleccionando la técnica de reparación más adecuada al estado del pavimento en estudio.

- **Rangos de calificación del PCI**

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. La tabla 2.3. se presentan los rangos de PCI con la correspondiente descripción cualitativa de la condición del pavimento.

Tabla 2.3. Rangos de calificación 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: Manual de pavimentos PCI (M.Y. shahin, S.D. Khon).

El cálculo del PCI se fundamenta en los resultados de una encuesta visual de la condición de pavimento en el cual se establecen su tipo, severidad y cantidad que presenta cada daño.

- **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.

Para la evaluación de pavimentos, la clase, está relacionada con el tipo de degradación que se presenta en la superficie de un pavimento, entre las que tenemos, piel de cocodrilo, exudación, agrietamiento en bloque, elevaciones, entre otros, cada uno de ellos se describe según cada tipo de falla.

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 del 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 2.3. se presentan algunas relaciones longitud - ancho de calzada pavimentada.

Tabla 2.4. Longitudes de unidades de muestreo

Ancho de calzada (m)	Longitud de la unidad de muestreo (m)
5,00	46,00
5,50	41,80
6,00	38,30
6,50	35,40
7,30 (máximo)	31,50

Fuente: Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concretos en carreteras, traducido por el ing. Luis Ricardo Vásquez, abril 2006.

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.

No todas las unidades de muestra requieren tener el mismo tamaño de muestra, pero deben ser similares patrones para asegurar la exactitud para el cálculo.

(Pavement condition index para pavimentos asfálticos y de concretos en carreteras, traducido por el ing. Luis Ricardo Vásquez, abril 2006)

- **Determinación de las unidades de muestreo para evaluación con el PCI**

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%.

- **Evaluación de un proyecto para determinar el PCI**

El muestreo se lleva a cabo siguiendo el procedimiento detallado a continuación.

Identificar tramos o áreas en el pavimento con diferentes usos en el plano de distribución de la red, tales como caminos y estacionamientos.

Dividir cada tramo en secciones basándose en criterios como diseño del pavimento, historia de construcción, tráfico y condición del mismo.

Dividir las secciones establecidas del pavimento en unidades de muestra.

Identificar las unidades de muestras individuales a ser inspeccionadas de tal manera que permita a los inspectores, localizarlas fácilmente sobre la superficie del pavimento. Es necesario que las unidades de muestra sean fácilmente reubicables, a fin de que sea posible la verificación de la información de fallas existentes, la examinación de variaciones de la unidad de muestra con el tiempo y las inspecciones futuras de la misma unidad de muestra si fuera necesario.

Seleccionar las unidades de muestra a ser inspeccionadas. El número de unidades de muestra a inspeccionar puede variar de la siguiente manera: considerando todas las unidades de muestra de la sección, considerando un número de unidades de muestras que nos garantice un nivel de confiabilidad del 95% o considerando un número menor de unidades de muestra.

Todas las unidades de muestra de la sección pueden ser inspeccionadas para determinar el valor de PCI promedio en la sección. Este tipo de análisis es ideal para una mejor estimación del mantenimiento y reparaciones necesarias.

El número mínimo de unidades de muestra “n” a ser inspeccionadas en una sección dada, para obtener un valor estadísticamente adecuado (95% de confiabilidad), es calculado empleando la siguiente ecuación y redondeando el valor obtenido de “n” al próximo número entero mayor.

$$n = N \times 2e24 \times N + 1 + 2$$

donde:

n = Número mínimo de unidades a evaluar.

N = Número total de unidades de muestreo en 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.

(Pavement condition index para pavimentos asfálticos y de concretos en carreteras, traducido por el ing. Luis Ricardo Vásquez, abril 2006)

- **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:

$$i = Nn$$

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.

- **Materiales e instrumentos para determinar el PCI**

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**

Huinchas 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.

2.8.1.1. Metodología de cálculo PCI

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 pasos 2.b. y 2.c.
- 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 repetir las etapas 3.a. a 3.c. 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 2.5. Planilla de datos para determinar CDV

No.	Valores Deducidos	Total	q	CDV
-----	-------------------	-------	---	-----

Fuente: Elaboración propia.

2.8.1.2. Metodología de 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:

$$PCI_S = N - A \times PCIR + A \times PCIA$$

Donde:

PCI_S = 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.

Criterios de inspección.

A continuación, se detallan algunos criterios importantes a tomar en cuenta durante la inspección visual que permitirán minimizar errores y aclarar interrogantes acerca de la identificación y medición de algunos tipos de fallas.

Si el agrietamiento tipo piel de cocodrilo y ahuellamiento ocurren en la misma área, cada falla es registrada por separado en su correspondiente nivel de severidad.

Si la exudación es considerada, entonces el agregado pulido no será tomado en cuenta en la misma área.

El agregado pulido debe ser encontrado en cantidades considerables para que la falla sea registrada.

Si una fisura no tiene un mismo nivel de severidad en toda su longitud, cada porción de la fisura con diferente nivel de severidad debe ser registrada en forma separada. Sin embargo, si los diferentes niveles de severidad en una porción de fisura no pueden ser fácilmente separados, dicha porción debe ser registrada con el mayor nivel de severidad presente.

Si alguna falla, incluyendo fisuras o baches, es encontrada en un área parchada, ésta no debe ser registrada; sin embargo, su efecto en el parchado debe ser considerado en determinar el nivel de severidad de dicho parche.

Se dice que una falla está desintegrada si el área que la rodea se encuentra fragmentada (algunas veces hasta el punto de desprendimiento de fragmentos).

2.8.1.3. Descripción de las fallas para determinar el PCI

En vista de las variaciones de severidad que presentan los distintos tipos de falla, se han descrito 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 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. Sobre carpeta.

M: Parcheo parcial o en toda la profundidad. Sobre carpeta. Reconstrucción.

H: Parcheo parcial o Full Depth. Sobre carpeta. Reconstrucción.

Figura 2.3. Severidad de la falla “piel de cocodrilo”



Baja severidad

Media severidad

Alta severidad

Fuente: pirhua.udep.edu.pe

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 metros cuadrados de área afectada. Si se contabiliza la exudación no deberá contabilizarse el pulimento de agregados.

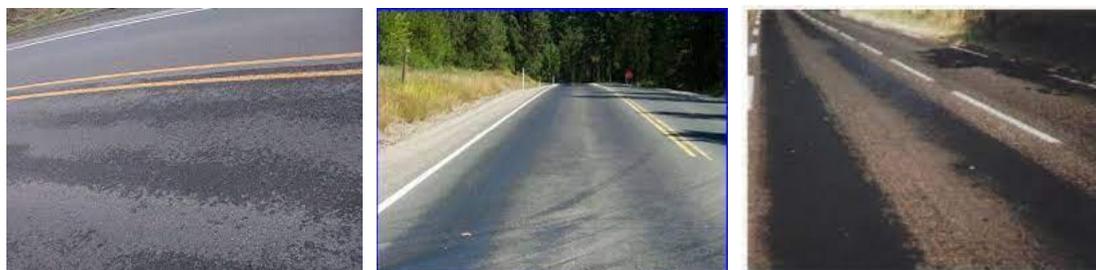
- **Opciones de reparación**

L: No se hace nada.

M: Se aplica arena / agregados y cilindrado.

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

Figura 2.4. Severidad de la falla “exudación”



Baja severidad

Media severidad

Alta severidad

Fuente: fallasenpavimentoflexible.blogspot.com

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 0,30 m a 3,00 m x 3,00 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 metros cuadrados de área afectada. Generalmente, se presenta un sólo 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 3,00 mm. Riego de sello.

M: Sellado de grietas, reciclado superficial. Escarificado en caliente y sobre carpeta.

H: Sellado de grietas, reciclado superficial. Escarificado en caliente y sobre carpeta.

Figura 2.5. Severidad de la falla “fisuras en bloque”



Severidad Baja

Severidad Media

Severidad Alta

Fuente: docplayer.es/134846618-Facultad-de-ingenieria.html

4) Fisura de borde

Son grietas paralelas al borde externo del pavimento, que se encuentran a una distancia de 0,30 y 0,50 m del borde exterior del pavimento. Este fallo 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 como 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 fisura de borde se mide en 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 2.6. Severidad de la falla “fisura de borde”



Severidad Baja



Severidad Media



Severidad Alta

Fuente: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles/file>

5) 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 sobre carpetas 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 y 50 mm.

M: La diferencia está entre 50 mm y 100 mm.

H: La diferencia en elevación es mayor que 100 mm.

- **Medida**

El desnivel carril /berma se miden en metros lineales.

- **Opciones de reparación**

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

Figura 2.7. Severidad de la falla “desnivel carril – berma”



Severidad Baja

Severidad Media

Severidad Alta

Fuente: repositoriotec.tec.ac.cr

6) Fisuras longitudinales y transversales.

Las fisuras 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 Pórtland, pero no las juntas de pavimento de concreto.

Las fisuras 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. Fisura sin relleno de ancho menor a 10 mm.
2. Fisura rellena de cualquier ancho (con condición satisfactoria del material llenante).

M: Existe una de las siguientes condiciones:

1. Fisura sin relleno de ancho entre 10 mm y 75 mm.
2. Fisura sin relleno de cualquier ancho hasta 75 mm, rodeada grietas aleatorias pequeñas.
3. Fisura sin relleno de cualquier ancho, rodeada de grietas aleatorias pequeñas.

H: Existe una de las siguientes condiciones:

1. Cualquier fisura rellena o no, rodeada de grietas aleatorias pequeñas de severidad media o alta.
2. Fisura sin relleno de más de 75 mm de ancho.
3. Fisura de cualquier ancho donde aproximadamente 100 mm del pavimento que lo rodea está severamente fracturado.

- **Medida**

Las fisuras longitudinales y transversales se miden en metros lineales. La longitud y severidad de cada grieta debe registrarse después de su identificación. Si la fisura no tiene el mismo nivel de severidad a lo largo de toda su longitud, cada porción de la fisura con un nivel de severidad diferente debe registrarse por separado. Si ocurren abultamientos o hundimientos en la fisura, estos deben registrarse.

- **Opciones de reparación**

L: No se hace nada. Sellado de grietas de ancho mayor que 3 mm.

M: Sellado de grietas.

H: Sellado de grietas. Parcheo parcial.

Figura 2.8. Severidad de la falla “fisuras longitudinales y transversales”



Severidad Baja

Severidad Media

Severidad Alta

Fuente: elaboración propia y invias.gov.co

7) Parches

Un parche es un área de pavimento la cual ha sido remplazada con material nuevo para reparar el pavimento existente. Un parche se considera un defecto no importa que 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 buena 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.

- Medida

Los parches se miden en metros cuadrados de área afectada. Sin embargo, si un sólo parche tiene áreas de diferente severidad, estas deben medirse y registrarse de forma separada. Ningún otro daño (por ejemplo, desprendimiento y agrietamiento) se registra dentro de un parche; aún 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 2.9. Severidad de la falla “parches”



Fuente: Elaboración propia e invias.gov.co

8) Agregado pulido

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 pulimento 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 pulimento deberá ser significativo antes de ser incluido en una evaluación de la condición y contabilizado como defecto.

- **Medida**

Se mide en metros cuadrados de área afectada. Si se contabiliza exudación, no se tendrá en cuenta el pulimento de agregados.

- **Opciones de reparación**

L, M, H. No se hace nada. Tratamiento superficial. Sobre carpeta. Fresado y sobre carpeta.

Figura 2.10. Severidad de la falla “agregado pulido”



Severidad Baja

Severidad Media

Severidad Alta

Fuente: invias.gov.co

9) Huecos o baches

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 el cuadro siguiente.

Tabla 2.6. Niveles de severidad para huecos

Profundidad máxima del hueco	Diámetro medio (mm)		
	102 a 203 mm	203 a 457 mm	457 a 762 mm
12,70 a 25,40 mm	L	L	M
>25,40 a 50,80 mm	L	M	H
> 50,80 mm	M	M	H

Fuente: Procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en caminos y estacionamientos ASTM D6433-03.

Si el diámetro del hueco es mayor que 750 mm, debe medirse el área en metros cuadrados y dividirla entre 0,50 m² para hallar el número de huecos equivalentes. Si la profundidad es menor o igual que 25 mm, los huecos se consideran como de severidad media. Si la profundidad es mayor que 25 mm la severidad se considera como alta.

- **Medida**

Los huecos no son medidos sino contados y registrados por separado de acuerdo a su nivel de severidad bajo, mediano o alto.

- **Opciones de reparación**

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

M: Parcheo parcial o profundo.

H: Parcheo profundo.

Figura 2.11. Severidad de la falla “huecos o baches”



Severidad Baja

Severidad Media

Severidad Alta

Fuente: elaboración propia y proyecplus.blogspot.com/2016/02/factores-que-afectan-al-pavimento.html

10) Peladura por intemperismo y desprendimiento de agregados

La peladura por intemperismo es la desintegración superficial del pavimento por pérdida de ligante asfáltico; mientras que el desprendimiento del agregado pétreo, hace referencia a partículas de agregado sueltas o removidas.

Ambas fallas indican que el ligante asfáltico ha sufrido un endurecimiento considerable o que la mezcla es de pobre calidad.

Las principales causas de este tipo de fallas son:

- Cargas de tráfico especiales como es el caso de vehículos de orugas.
- Ablandamiento de la superficie y pérdida de agregados debido al derramamiento de aceite de vehículos.
- Mezcla de baja calidad con ligante insuficiente.
- Uso de agregados sucios o muy absorbentes.
- Falla de adherencia agregado – asfalto debido al efecto de agentes externos

- 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 metros cuadrados de área afectada.

- **Opciones de reparación**

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

M: Sello superficial. Tratamiento superficial. sobre carpeta.

H: Tratamiento superficial. sobre carpeta. Reciclaje. Reconstrucción.

Figura 2.12. Severidad de la falla “peladura por intemperismo y desprendimiento de agregados”



Severidad Baja

Severidad Media

Severidad Alta

Fuente: Elaboración propia

2.8.2. Índice de regularidad internacional (IRI)

La regularidad superficial se define normalmente por el Índice Internacional de rugosidad (IRI), (en inglés “international roughness index”) definido como la sumatoria de la

amplitud de las ondulaciones por kilómetro de carretera. Los índices se obtienen midiendo el perfil longitudinal y aplicando un modelo matemático de análisis para reducir el perfil a un índice estandarizado.

La condición del tramo de la carretera es, entonces, definida en función de la rugosidad. Considerando que normalmente las mediciones de rugosidad no forman parte del alcance de trabajo de un proyecto (aun en nuestro país no existen equipos para determinar la rugosidad adecuadamente) y ante la ausencia de información al respecto, se puede recurrir a la información del Plan Maestro de Transporte y de otros proyectos sobre el inventario de carreteras. Con estos antecedentes se califica a una carretera como mala, cuando los valores del IRI están en un rango de 8 a 12 IRI (International Roughness Index m/km).

Aunque en la literatura se encuentran distintas definiciones del IRI, se puede decir que el Índice de Rugosidad Internacional se define como la acumulación del movimiento vertical no deseado que sufre la suspensión de una rueda (un cuarto de carro) cuando éste recorre la superficie a una velocidad de referencia de 80 km/h. Es pues, un índice de comodidad de rodadura, y constituye el parámetro de la vía que mejor percibe el usuario.

Es de señalar que la rugosidad superficial es mucho más valorada por el usuario que la capacidad estructural, ya que ésta última tan sólo la percibe en forma indirecta cuando se presentan deterioros en la superficie del pavimento como consecuencia de las deficiencias estructurales del mismo.

El IRI es una medida de la influencia de la calidad del perfil longitudinal de una carretera en la calidad de la rodadura, que representa la vibración de un vehículo típico de pasajeros como resultado de la falta de regularidad de la superficie de la vía.

El IRI es un indicador independiente del equipo de medida, lo que depende del equipo son los datos de entrada o cotas del perfil.

- **Clasificación de equipos para la medición del IRI**

Los equipos utilizados en la medición de la regularidad de las carreteras, están clasificados de acuerdo a dos parámetros: el intervalo de almacenamiento de datos y la resolución de medición vertical.

- **Método de medición de la rugosidad con rugosímetro de MERLIN**

El rugosímetro de Merlín, es un instrumento versátil, sencillo y económico, pensado especialmente para uso en países en vías de desarrollo.

El Laboratorio Británico de Investigación de Transportes y Caminos (TRRL) desarrolló el Rugosímetro Merlín (acrónimo de la terminología inglesa Machine for Evaluating Roughness using low-cost Instrumentation), basándose en el principio del perfilómetro estático, con el objetivo de obtener un equipo de bajo costo, fácil manejo y un método de análisis simple con resultados confiables.

La gran ventaja en el uso del Merlín es la exactitud en los resultados que solo puede ser superada por el método de Mira y Nivel. Pero también tiene la desventaja de que el rendimiento ofrecido por este equipo es muy bajo comparado con los equipos electrónicos y/o dinámicos y el problema es mayor aun cuando es necesario evaluar grandes distancias de carretera y si los resultados son necesarios con prontitud la utilización del Merlín se hace improductivo.

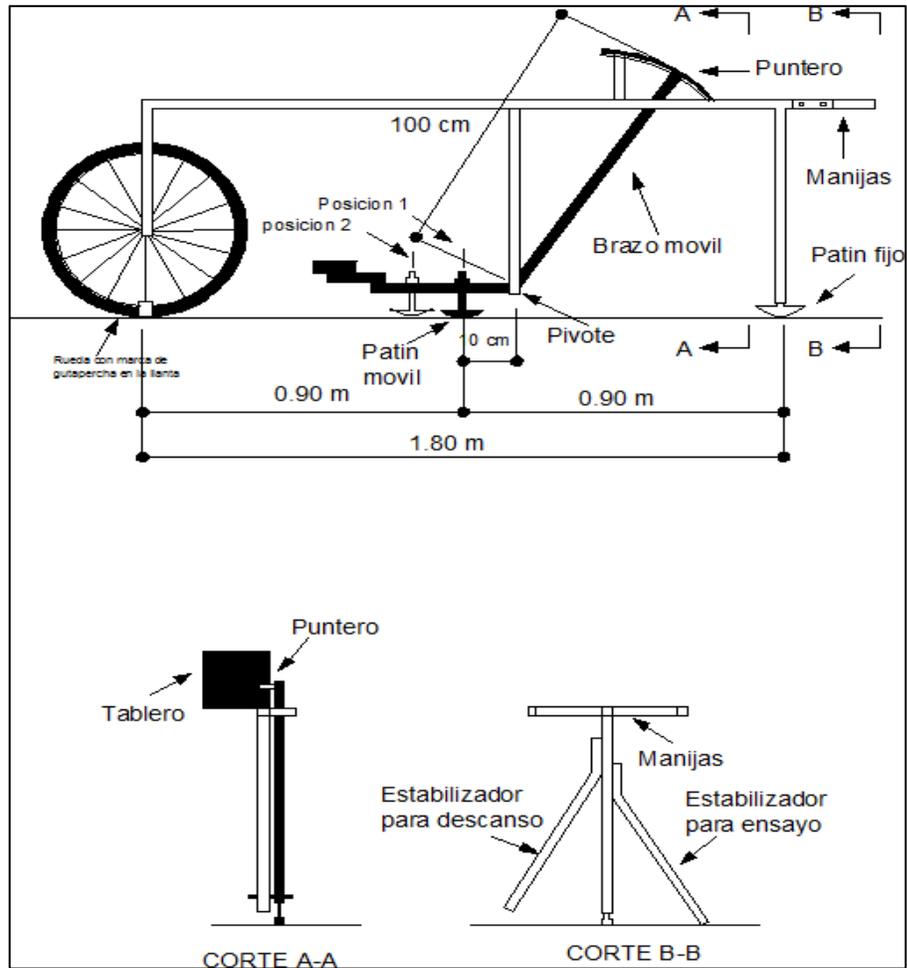
- **Esquema y representación de las partes de un equipo Merlín**

El Merlín es un equipo sencillo y fácil operación, lo cual hace que su utilización resulte completamente económica cuando se trate de evaluar tramos cortos de carretera.

Consta de:

- Patín móvil
- Pivote
- Brazo móvil
- Puntero
- Manijas
- Patín fijo
- Tablero
- Estabilizador para descanso
- Estabilizador para ensayo

Figura 2.13. Esquema del rugosímetro de Merlín

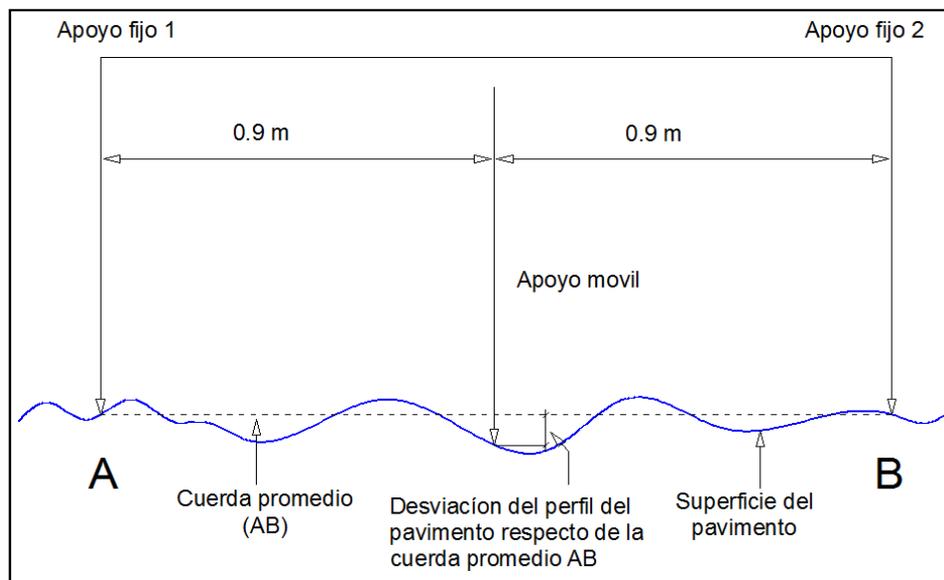


Fuente: Del Aguilar Rodríguez, Pablo, 1999.

- 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.

Figura 2.14. Desviación del pavimento respecto a la cuerda promedio

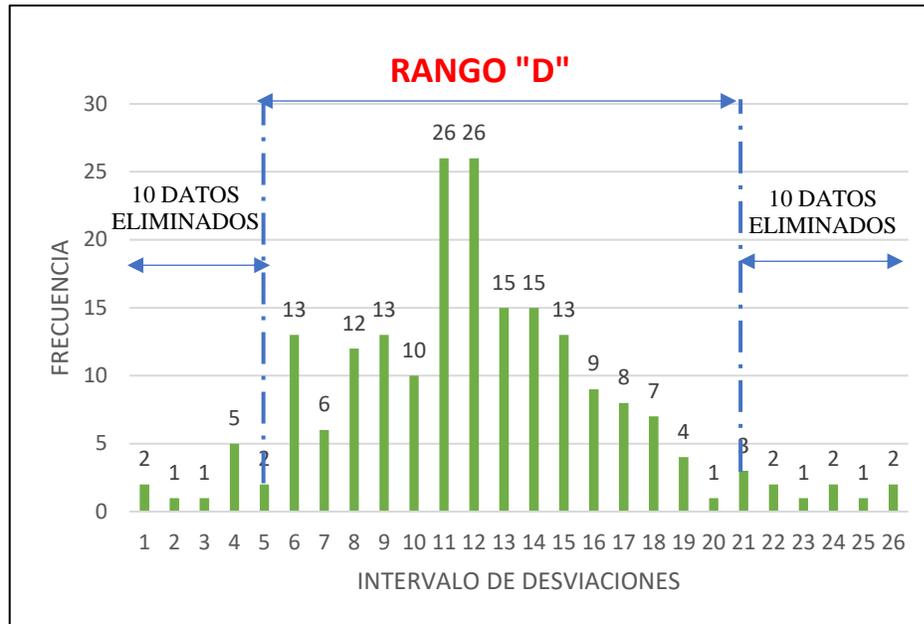


Fuente: Del Aguilar Rodríguez, Pablo, 1999. Manual del usuario MERLINER

- **Histograma de la distribución de frecuencia**

Se debe medir 200 desviaciones en forma continua para poder obtener el histograma de distribución de frecuencias, en el histograma existe la posibilidad de medir dispersión de las desviaciones, en la figura que sigue se muestra el parámetro estadístico “D” que representa la rugosidad del pavimento en escala Merlín, luego de hacer la depuración de 5% (10 datos) a cada lado (cola) del histograma, el máximo rango “D” debe ser convertido a unidades IRI mediante ecuaciones de correlación.

Figura 2.15. Histograma de la distribución de frecuencias



Fuente: Elaboración propia

- **Correlaciones "D" versus IRI**

A partir de las investigaciones por encargo del Banco Mundial en la década de los 80's se estableció como parámetro patrón para relacionar los resultados obtenidos con la gran variedad de equipos medidores del 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.

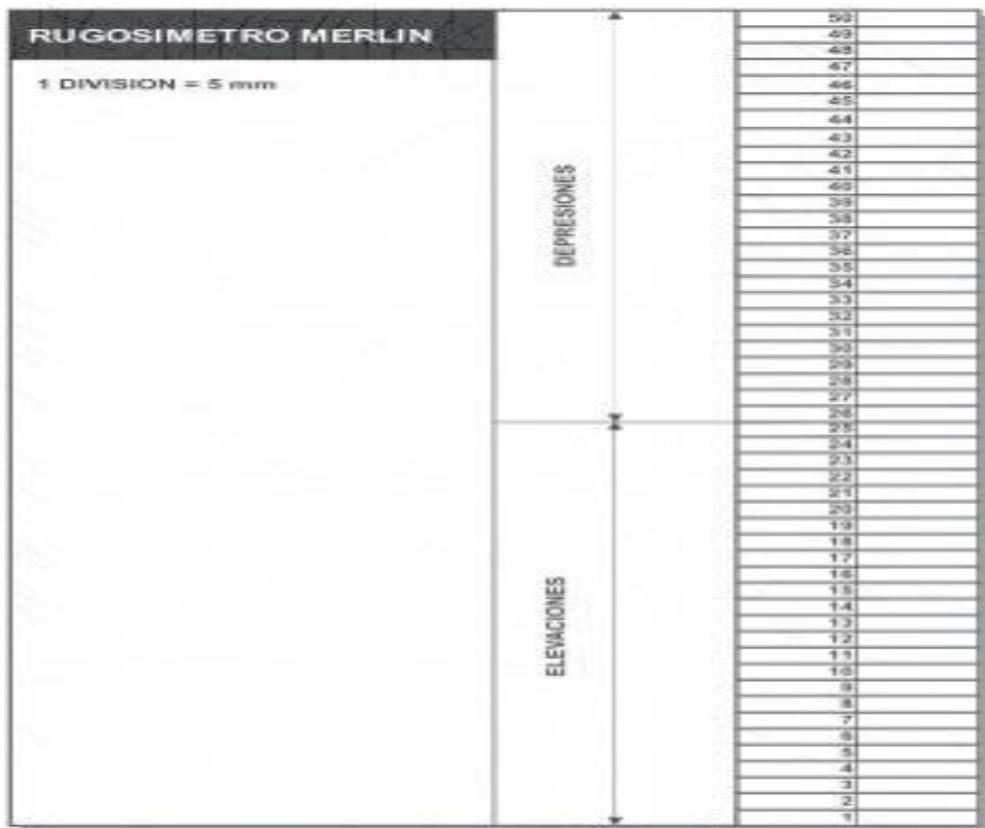
Según la clasificación de equipos para medición de la regularidad superficial de pavimentos, propuesta por el Banco Mundial, el Merlín pertenece a la Clase 1, por obtener resultados muy exactos solo superado por el método de Mira y Nivel y además de ser una variación del perfilómetro estático.

- **El tablero del Merlín**

La relación entre el patín móvil – pivot y pivot – puntero es de 1 a 10, lo cual da entender que un movimiento en la parte inferior del patín móvil produce un desplazamiento de 1cm (10 mm) en el puntero.

Para registrar los movimientos del puntero, se utiliza una escala gráfica con 50 divisiones, de 5 mm de espesor cada una, que va adherida en el borde del tablero sobre el cuál se desliza el puntero.

Tabla 2.7. Tablero Merlín



Fuente: Del Aguilar Rodríguez, Pablo, 1999.

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 2.8 Formato de planilla para toma de datos

Proyecto:
Sector:
Elaborado por:
Carril: Fecha :

LECTURAS CAMPO										
	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

- Método para el cálculo de la rugosidad

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.

- **Factor de corrección para ajuste de “D”**

La condición de relación de los brazos del Rugosímetro de 1 a 10 en ocasiones se cambia, como consecuencia del desgaste del patín del brazo móvil, lo cual debe ser ajustado con el factor de corrección “FC”. El procedimiento de obtención de “FC” se encuentra en: “Metodología para la Determinación de La Rugosidad de los Pavimentos, Pablo del Águila Rodríguez.”

La ecuación a utilizar para el ajuste de “D” es:

$$F.C. = \frac{EP * 10}{(LI - LF) * 5}$$

Donde:

EP= Espesor de la pastilla

LI= Posición inicial del puntero

LF= Posición final del puntero

Al multiplicar el rango “D” por el F.C. se obtiene el valor de la rugosidad en “unidades Merlín”.

- **Determinación de la rugosidad en la escala del IRI**

Para transformar la rugosidad de unidades Merlín a la escala del IRI, se usa las expresiones.

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

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

Calculado el IRI característico, el sector o tramo será aceptado si cumple con lo siguiente:

- Para pavimentos asfálticos nuevos, el IRI deberá ser menor o igual a 2,0 m/km.
- Para pavimentos con recapado asfáltico, el IRI deberá ser menor o igual a 2,5 m/km.
- Para pavimentos con sellado asfáltico, el IRI deberá ser menor o igual a 3,0 m/km.

En caso de no cumplirse con estos límites, el sector o tramo deberá subdividirse en secciones de rugosidad homogénea, y se calculará el IRI característico para cada una de ellas, los que deberán cumplir los límites indicados. (Del Aguilar Rodríguez, Pablo, 1999)

Figura 2.16. Rugosímetro de Merlín empleado para los ensayos



Fuente: Elaboración propia.

2.8.3. Índice de Fricción Internacional (IFI)

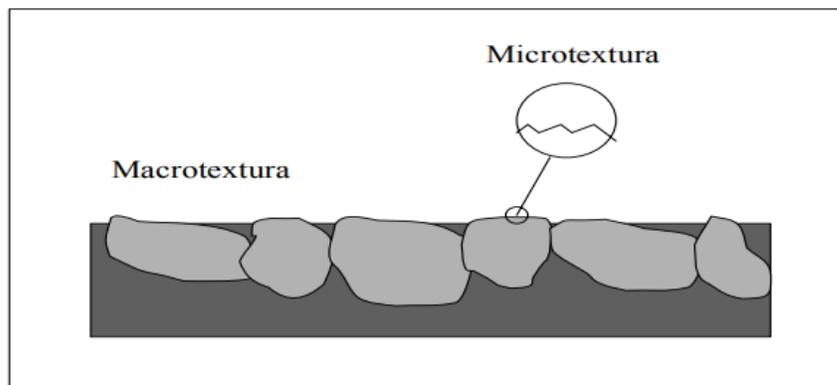
Las características de resistencia al deslizamiento de un pavimento, se puede definir considerando que la adherencia superficial está determinada por dos tipos de condiciones: microtextura y macrotextura.

La microtextura 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.

Macrotextura depende del tamaño máximo de los agregados y de la composición de la mezcla, riego o lechada asfáltica o del tratamiento de superficializado 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.

Figura 2.17. Diferencia entre microtextura y macrotextura



Fuente: Cfr. Crespo 1999. El Índice de Fricción Internacional (IFI)

El coeficiente de fricción de un pavimento varía según:

- Las características del pavimento.
- La densidad del tránsito.
- Condiciones de la vía.
- Grado de humedad en la superficie y temperatura.

- **Péndulo Británico**

Respecto al Péndulo de Fricción, este es un dispositivo muy difundido internacionalmente, principalmente por su bajo costo en comparación a otros equipos más sofisticados. Este equipo desarrollado por el TRRL, tiene sus mediciones normalizadas según ASTM E-303, Para efectuar la medida, este se ajusta de modo que el patín de goma, fijado en el péndulo, recorra una distancia normalizada en la superficie a medir.

El péndulo se balancea desde la vertical hasta el reposo. La pérdida de energía del péndulo debido a la fricción del pavimento se registra en una escala graduada. Este instrumento es indicativo de la resistencia al deslizamiento a bajas velocidades (< 50 km/hr), por consiguiente, provee medidas para la microtextura. La medición entrega como resultado el valor BPN (British Pendulum Number).

Figura 2.18. Equipo péndulo británico



Fuente: Elaboración propia

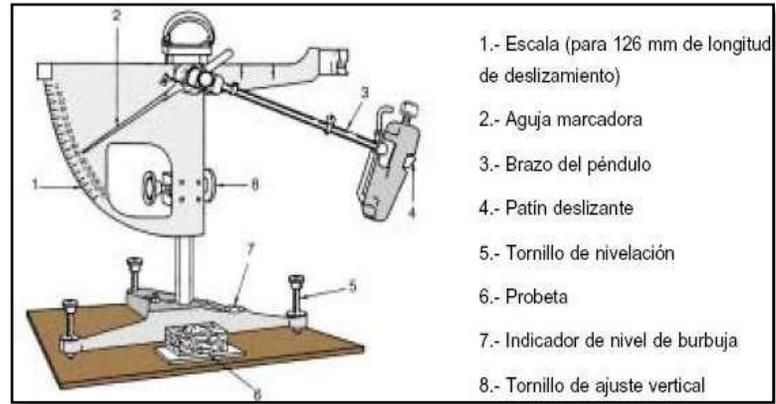
- **Elementos que conforman el péndulo británico**

Para utilización del equipo, se debe contar con lo siguiente:

- Regleta graduada.
- Termómetro láser.
- Recipientes para agua.

- Cepillo con cerdas de goma.
- Agua (potable o destilada).

Figura 2.19. Esquema del péndulo británico

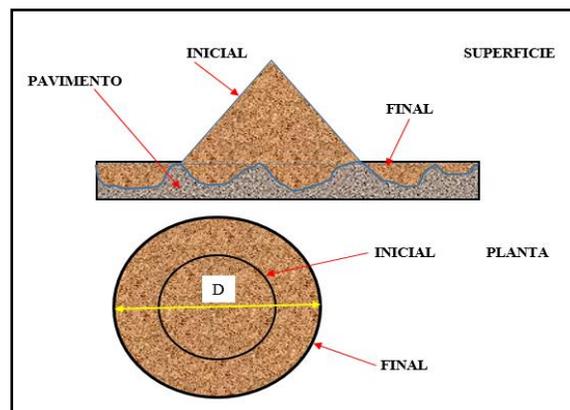


Fuente: S.N.2004

➤ **Círculo de arena (mancha de arena)**

Permite determinar el promedio del espesor de la macrotextura (rugosa o lisa) de la superficie del pavimento y sus medidas puntuales mediante un círculo de arena, según la norma ASTM E965-15.

Figura 2.20. Círculo de arena



Fuente: Elaboracion propia

El cociente entre el volumen conocido y el área del círculo determina la altura o profundidad de la macrotextura del pavimento. A ese valor generalmente comprendido en una banda que va de 0,3-0,4mm a 2-3 mm se le llama altura H de la mancha de arena, que define la profundidad media de la textura del pavimento.

El valor está muy ligado al tipo de pavimentos que se construya. Así por ejemplo los tratamientos superficiales y los pavimentos de hormigón presentan valores de textura mayores que las mezclas bituminosas y para estas, el tipo de mezcla y el tamaño máximo del árido empleado definen una banda de valores de textura bastante amplia. El ensayo es útil para valores de textura superiores a 0,25 mm. El ensayo está normalizado en la mayoría de los países.

2.8.3.1. Metodología de cálculo del IFI

Como se mencionó anteriormente, el IFI relaciona la fricción de un pavimento con la velocidad de deslizamiento de un vehículo. Para esto se estima una constante de referencia de velocidad (S_p) y la fricción a una velocidad de 60 km/h donde finalmente se obtiene una curva de fricción- velocidad de deslizamiento.

1) Realizar los dos tipos de medidas sobre el pavimento a evaluar con los equipos disponibles

- Fricción (FR)
- Textura (Tx)

2) Designación de las parejas de valores

La pareja de los valores (F_{60} , S_p) se designa como el IFI de un pavimento. Estos valores permitirán dibujar la curva de referencia estimada de fricción – velocidad de deslizamiento del pavimento a ensayar.

a) Determinación de la constante de velocidad S_p :

$$a) S_p = a + b \times Tx$$

Donde:

S_p = Constante de velocidad

Tx = H o altura de macrotextura del pavimento

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

b) Determinación de la constante FR60:

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

Donde:

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

FRs = Fricción a la velocidad de la medición del equipo

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

Sp= Constante de velocidad

c) Determinación de la fricción de referencia F60:

$$F60 = A + (B \times FR60) + (C \times Tx)$$

Donde:

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

A, B y C = 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.

Tx = Medida de la macrotextura con el equipo utilizado

Es así como la pareja de valores F60 y Sp forman el índice de fricción internacional (IFI):

(F60, Sp)

3) Obtención de la curva fricción-deslizamiento

Se obtiene con los valores calculados IFI de un pavimento. Con esta curva se permite calcular el valor de la fricción F(S) a cualquier velocidad de deslizamiento S según la expresión siguiente: (AIPCR, 1995).

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

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)

El valor del IFI está representado por: (F60, Sp).

Para así poder dar una calificación en función a los valores de condición en función de las siguientes tablas.

Tabla 29. Valores de fricción con el Péndulo Británico

Fricción	Calificación
<0,50	Malo (Deslizamiento del vehículo)
0,51-0,60	De regular a bueno
0,61-0,80	Bueno
0,81-0,90	De bueno a regular
>0,91	Malo (Desgaste de los neumáticos)

Fuente: Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento ASTM E 1960, Ing. Fabricio Leiva

Tabla 2.10. Textura en pavimentos para el círculo de arena

Textura	Círculo de arena HS (mm)
Muy fina	HS < 0,20
Fina	0,20 < HS < 0,40
Media	0,40 < HS < 0,80
Gruesa	0,80 < HS < 1,20
Muy gruesa	> 1,20

Fuente: Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento ASTM E 1960, Ing. Fabricio Leiva

2.8.4. Índice de serviciabilidad del pavimento (PSI)

La AASHTO (American Association of State Highways and Transportation Officials), fue la primera en sistematizar un procedimiento objetivo para establecer el nivel de deterioro de los pavimentos, procurando relacionar la condición funcional con la estructural. Introdujo para ello el concepto de serviciabilidad. La serviciabilidad como se dijo, es la percepción que tienen los usuarios del nivel de servicio del pavimento y es por lo tanto un aspecto subjetivo.

El Índice de Serviciabilidad Presente nos sirve de apoyo para determinar si la superficie de rodamiento necesita mejorarse, pero por sí solo no debe usarse para diseño de sobre carpetas u otras mejoras.

Índices de Serviciabilidad Presente altos, corresponden a condiciones más satisfactorias. Cuando un tramo denota calificaciones bajas (de 2,50 hacia abajo), se debe hacer un examen más detallado de la superficie, utilizando, si es necesario, otros métodos para su evaluación. La experiencia indica que un PSI comprendido entre 2,50 y 0,00, denota la necesidad de hacer trabajos de reforzamiento a la carretera en estudio.

➤ **Metodología de cálculo del PSI**

Tanto el IRI como el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI) se calculan a partir de prácticamente el mismo parámetro, de manera que se han desarrollado varias correlaciones entre el IRI y el PSI.

Muchas agencias realizaron correlaciones entre el PSI y el IRI. A continuación, se presentan dos de ellas.

Paterson:

$$PSI = 5 * e^{-0,18*IRI}$$

Donde:

e= Base de los logaritmos naturales

IRI= Índice de regularidad internacional (m/Km)

Guillespie:

Es recomendada para valores de IRI menores a 0,47 m/km

$$PSI = 5 - 0,63 * IRI$$

➤ **Rangos de calificación**

A continuación, se presenta una tabla comparativa de los valores de IRI obtenidos para las correlaciones de Paterson y Gillespie, con respecto a valores de PSI y adicionalmente la aceptabilidad de los usuarios.

Calificación del índice de serviciabilidad presente (PSI) según AASHTO:

Tabla 2.11. Niveles de aceptabilidad para las diferentes correlaciones

Calificación	Estado del pavimento
4,50 – 5,00	Excelente
3,10 – 4,40	Bueno
2,60 – 3,00	Regular a bueno
2,10 – 2,50	Regular a malo
1,10 – 2,00	Malo
0,00 – 1,00	Muy malo

Fuente: AASHTO 97.

2.9. Evaluación estructural de pavimentos flexibles

2.9.1. Evaluación con Viga Benkelman

Desarrollada en el road test de la AASHTO en 1952, consiste en un dispositivo sencillo que opera por medio de una palanca suspendida de un bastidor que transmite la deflexión vertical del punto de medida a un comparador (ver gráfico 36). Este equipo debe ser usado con un camión cargado, normalmente con 80 KN en un eje, con llantas duales infladas a una presión de 0,48 a 0,55 MPa (70 a 80 PSI).

Figura 2.21. Viga Benkelman



Fuente: Elaboracion propia

➤ Metodología para la medición de la deflexión con la viga Benkelman

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 $\pm 1\%$. 83 se debe

verificar que la presión de inflado en las llantas esté a 80 psi. 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. 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. 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). Tomar la temperatura del pavimento para cada ensayo. Repetir este procedimiento en cada uno de los puntos de ensayo. Se recomienda utilizar las distancias indicadas en la siguiente tabla.

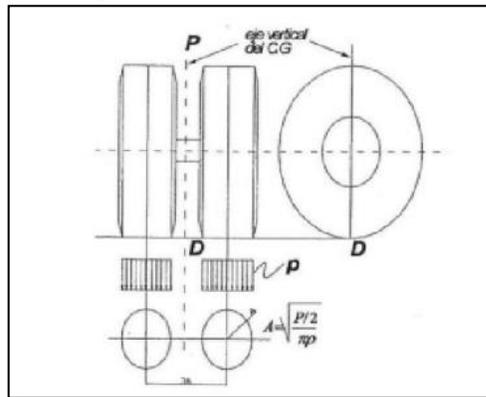
Tabla 2.12. Recomendaciones del punto de ensayo sobre el pavimento

Ancho del carril	Distancia del punto de ensayo desde el borde del pavimento
2,70 m	0,45 m
3,00 m	0,60 m
3,30 m	0,75 m
3,60 m o mas	0,90 m

Fuente: Manual de ensayo de materiales (EM 2000).

La rueda dual externa deberá ser colocada sobre el punto seleccionado, quedando este ubicado entre ambas llantas. Para la correcta ubicación de la misma es conveniente colocar en la parte trasera externa del camión una gula vertical en correspondencia con el eje de carga; desplazando suavemente el camión, se hace coincidir la guía vertical con la línea 84 transversal indicada, de modo que simultáneamente el punto quede entre ambas llantas de la rueda dual y que coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto. Para toda esta operación es aceptable una tolerancia en el rango de 3” alrededor del punto.

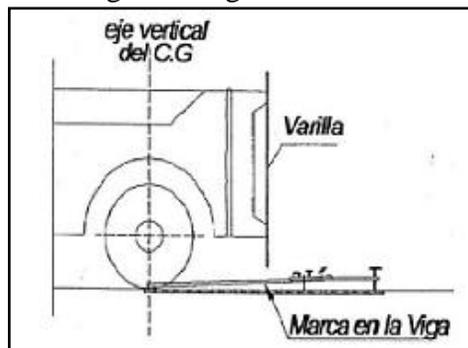
Figura 2.22. Viga coincidente con el centro de las llantas



Fuente: www.nestorhuaman.pe.

Se coloca la viga sobre el pavimento, detrás del camión, perpendicularmente al eje de la carga, de modo que la punta de prueba del brazo móvil (del primer brazo de mayor longitud, el caso sea doble) coincida con el punto de ensayo y la viga no roce contra las cubiertas de las llantas de la rueda dual. Dado que esto último se dificulta por la inaccesibilidad tanto visual como manual, se realizará previamente la siguiente operación: se coloca la viga en la posición como si estuviera entre las llantas, pero en la parte exterior de las mismas, haciendo coincidir igualmente, haciendo uso de la plomada, el extremo del brazo móvil con el eje vertical del centro de gravedad. Tomando como punto de referencia la varilla vertical adosada a la parte trasera del camión, se efectúa una marca en la viga de manera tal que, en adelante, basta con hacerlas coincidir (la marca con la varilla vertical) para asegurarse que el extremo de la viga coincide con el centro de las llantas, en el momento de iniciar las mediciones.

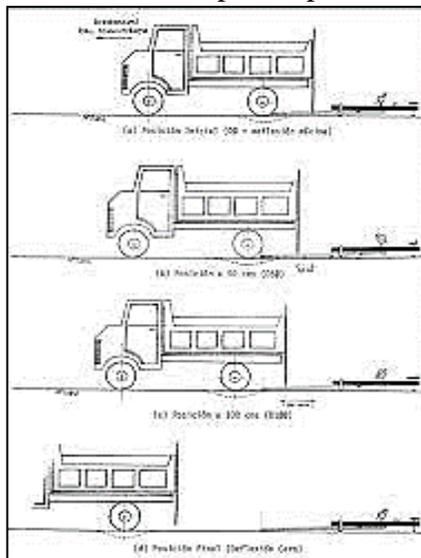
Figura 2.23. Configuración geométrica del sistema de carga



Fuente: www.nestorhuaman.pe

De igual forma se puede efectuar, a partir de la primera, sucesivas marcas a distancias elegidas a las cuales se desee medir deflexiones adicionales (puede ser a 50, 75 y 100 cm) o por lo menos 3 lecturas, pero se pueden obtener más, con fines de verificación, lo cual es recomendable, o si es que se desea obtener una idea grafica del tipo de curva de deflexiones que se producen. Como norma se realiza marca adicional a una distancia de 50 cm para la deflexión que servirá para el cálculo del radio de curvatura. Seguidamente se realizará a los 75 y 100 pudiendo variar estas últimas, los cuales ayudaran a un mejor análisis. Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la guía vertical y la marca inicial, se verificará que esta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se retira o liberan los seguros del o brazos móviles y se ajusta la base de la viga por medio del tornillo trasero, de manera que el o los brazos móviles de medición quede en contacto con el vástago del o diales. Se hace avanzar suave y lentamente el camión procediéndose a tomar las lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con la primera, segunda y demás marcas adicionales, y una lectura final cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo hasta una distancia de 4 a 5 metros aproximadamente en que el indicador del dial ya no tenga movimiento, registro que corresponde al punto de referencia con deflexión cero.

Figura 2.24. Posiciones adoptadas por el vehículo de carga



Fuente: Estudios de evaluación estructural

Con el fin de medir la temperatura del pavimento se usará un termómetro para este fin, 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.

Tratamientos superficiales bituminosos: 38°C. 87

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

Para la realización de esta rutina de medición en campo será necesario del concurso de tres operadores como mínimo: uno que le y dicte las lecturas, un operador que anote las mediciones y un ayudante que coordine con el conductor del camión y a la vez de aviso cuando las varillas adosada al camión vaya coincidiendo con las marcas hechas en la viga. Una vez tomados los datos de campo, el cálculo de las deflexiones para cada sección consiste en sustraer la lectura final (punto de referencia de deflexión cero) a cada una de las otras, representando las respectivas diferencias la deformación en dichos puntos, las cuales en conjunto definen la curva de deflexión de superficie de pavimento.

➤ **Metodología de cálculo con la viga Benkelman**

Cálculo de la deflexión máxima

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

Donde:

Do= Deflexión máxima

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

Lo= Lectura inicial

Lf= Lectura final

Deflexión media a la distancia:

$$D50 = K * (Lf - L50)$$

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

Lf= 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:

$$D20 = \frac{Dt}{k * (t - 20^{\circ}C) * e + 1}$$

Donde:

D20= Deflexión a la temperatura estándar

Dt= Deflexión a la temperatura t

k= Coeficiente del asfalto medida para cada ensayo

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 2.13. Factor de corrección por estacionalidad

Tipo de suelo subrasante	Estacion lluviosa	Estacion seca
Arenosa-permeable	1	1,10 a 1,30
Arcillosa-sensible al agua	1	1,20 a 1,40

Fuente: Estudio CONREVIAl

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.

$$Rc = \frac{6250}{K * (Do - D50)}$$

Donde:

Rc= Radio de curvatura (m)

Do= 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:

$$Da = \left(\frac{1,15}{N18} \right)^{\frac{1}{4}}$$

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.

$$Do < Dadm$$

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

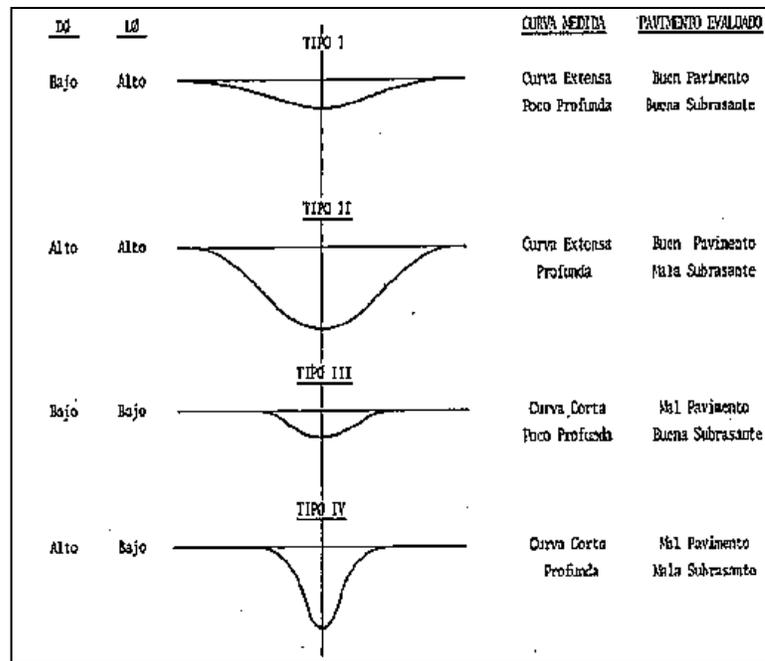
Los valores de radio de curvatura calculados son mayores a 100 m.

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

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

$$300 < R_c < 500$$

Figura 2.25. Significado cualitativo de las diferentes curvas de deflexiones



Fuente: Medición y análisis empírico de deflexiones (Ing. Pablo del Águila).

Deflexión media:

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

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

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

$$Cv = \frac{\sigma}{Dm} * 100$$

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:

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

Donde:

Dc= Deflexión característica

Dm= Deflexión promedio de los valores Do

σ = Desviación estándar

t= Coeficiente porcentual del área con probabilidad de superar Dc

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 Dc correspondiente.

En este caso t=1,645 que es una probabilidad al 95%

Tabla 2.14. Significado ecuaciones de deflexión característica

Valor diseño %	Deflexión característica Dc	Extensión del pavimento con D > Dc
		%
50	D	50
75	D + 0,67* σ	25
85	D + σ	15
90	D + 1,30* σ	10
95	D + 1,64* σ	5
98	D + 2,00* σ	2
99	D + 2,33* σ	1
99,9	D + 3,00* σ	0,1

Fuente: Estudio CONREVIAL.

Deflexión admisible:

La deflexión admisible es un parámetro que está definido en función al tráfico de diseño, que establece un límite para la deflexión característica, durante un periodo considerado. La expresión analítica que define este parámetro es de acuerdo a la metodología del Dr. C. Ruiz (Argentina).

$$Da = \left(\frac{1,15}{N18} \right)^{1/4}$$

Donde:

Da= Deflexión característica admisible (inicial) en mm

N18= Número de ejes estándar equivalentes de 8,2 ton acumulados en millones

La determinación del número de ejes equivalentes se adquiere de acuerdo a normas de construcción de vías.

➤ Análisis de tránsito – eje equivalente

En el funcionamiento estructural de las capas de la estructura del pavimento, influye el tipo de suelo de la subrasante, el número total de los vehículos pesados por día o durante el periodo de diseño, incluido las cargas por eje y la presión de los neumáticos.

La demanda o volumen de tráfico, requiere ser expresado en términos de ejes equivalentes acumulados para el periodo de diseño. El concepto de eje equivalente se basa en la posibilidad de evaluar el daño que produce determinada carga y compararla con otra de referencia.

Con los datos corregidos se procede a la elaboración de deflectogramas.

Los deflectogramas son un elemento fundamental para el análisis de la variabilidad de la capacidad estructuras, donde se puede diferenciar secciones de distinta capacidad estructural en un mismo tramo, de esta manera se identifica secciones de diferente capacidad estructural y/o comportamiento. (Evaluación estructural usando viga Benkelman aplicada a un pavimento, Javier Balarezo, Piura, agosto de 2017.

2.9.2. Calicatas o pozos a cielo abierto

Las calicatas permiten la inspección directa del suelo que se desea estudiar, por lo tanto, es un método de exploración confiable, pero sacrifica la estructura del pavimento y tiene muy bajo rendimiento.

El área que utilizan es más o menos un metro cuadrado y la profundidad varía según las exigencias de la investigación. Estas suelen realizarse, generalmente, centradas en la línea de borde de la carretera, frente a juntas o grietas.

Figura 2.25. Elaboración de una calicata



Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento

Se elige el lugar donde se realizará la excavación de la muestra, según sea la situación de la carretera a evaluar.

La excavación se lleva a cabo mediante métodos mecánicos estándares, como ser el pico y la pala.

Las dimensiones de excavación serán de 0,70 metros de largo 0,60 metros de ancho y una profundidad que depende del tipo de exploración.

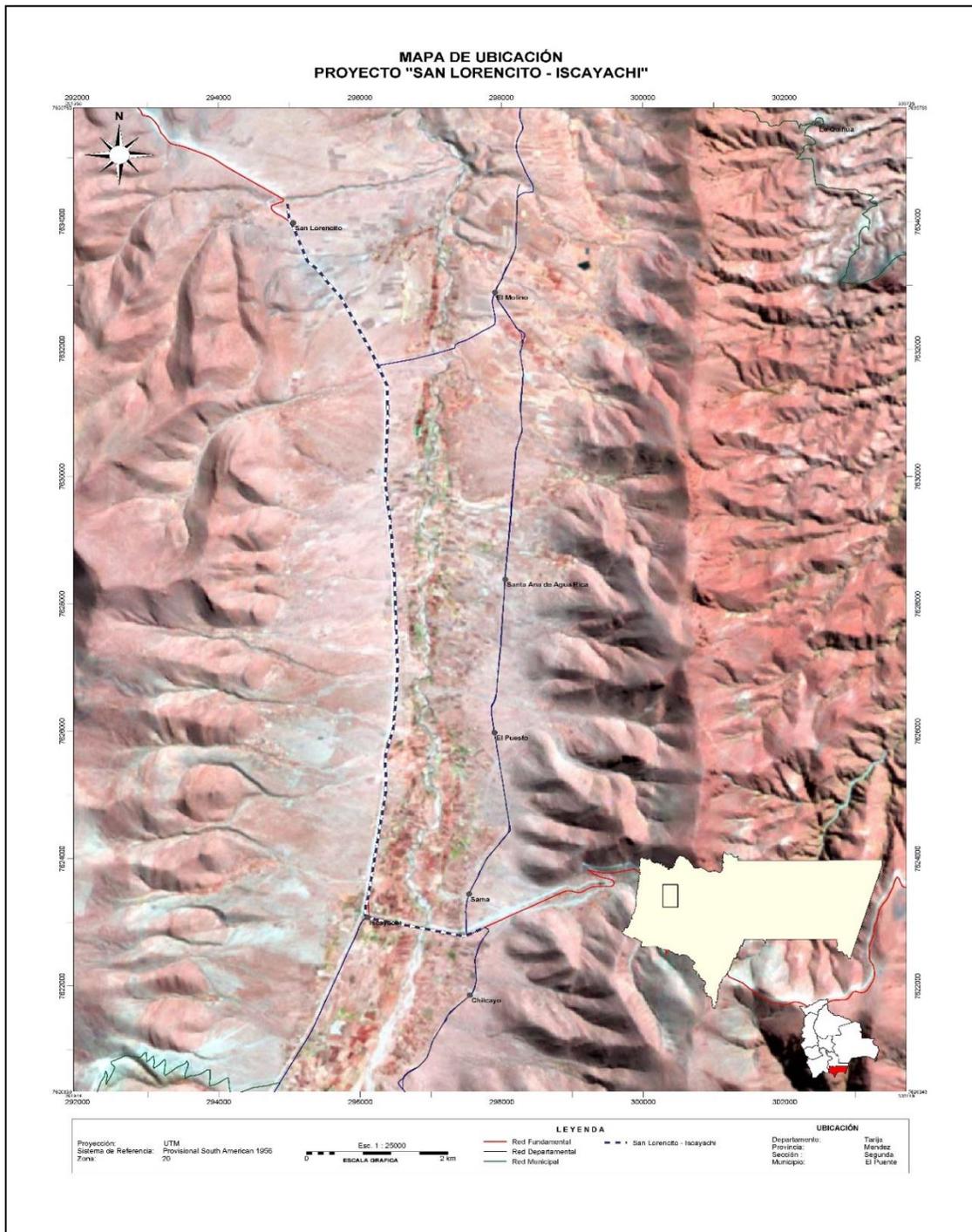
El registro fotográfico es indispensable.

Las calicatas no deben permanecer abiertas durante un periodo de tiempo prolongado. Una vez haya concluido el muestreo y la documentación de la zona el pozo de prueba rellenarse y compactarse para evitar peligros potenciales en el área de trabajo.

CAPÍTULO III

EVALUACIÓN SUPERFICIAL Y ESTRUCTURAL DEL TRAMO EN ESTUDIO

Figura 7. Tramo "San Lorencito – cruce Iscayachi"



Fuente: SEDECA.

Geográficamente se encuentra entre las coordenadas geográficas:

San Lorencito:

Latitud: 21° 23' 16,80" S

Longitud: 64° 58' 43,45" O

Altitud: 3425 m.s.n.m.

Iscayachi:

Latitud: 21° 29' 09,36" S

Longitud: 64° 58' 12,03" O

Altitud: 3436 m.s.n.m.

En coordenadas UTM se encuentra en:

San Lorencito:

E: 7633617,32

N: 294858,29

Zona 20

Iscayachi:

E: 7622780,41

N: 295901,46

Zona 20

3.2. Características del tramo en estudio

El tramo “San Lorencito – cruce Iscayachi” llega a ser concluida el 2006 y el tramo de inicio se encuentra en las afueras de la ciudad de Tarija a 58,8 km de distancia del kilómetro cero de la urbe Tarijeña. Según el servicio departamental de caminos (SEDECA) se tiene la siguiente descripción técnica del tramo.

Longitud total:	11,00 km
Pendiente máxima:	3,00 %
Pendiente transversal:	2,00 %
Topografía:	Llana
Categoría de carretera:	Clase IV-A
Velocidad directriz:	40,00 km/hr
Ancho de carril:	3,50 m
Ancho de calzada:	7,00 m
Ancho de bermas (San Lorencito – cruce Iscayachi):	1,80 m
Ancho plataforma (San Lorencito – cruce Iscayachi):	8,00 m
Radio de curvatura mínimo:	40,00 m

3.3. Evaluación superficial

3.3.1. Determinación del índice de condición de pavimento (PCI)

Se detallara la metodología aplicada para la evaluación superficial del tramo “San Lorencito – cruce Iscayachi”, siguiendo los lineamientos definidos por el método PCI, procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento, ya que el método PCI permitirá conocer el estado de la superficie del tramo, este método llega a ser moroso y requiere mucho tiempo para realizarlo, en 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

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

Carreteras con capa de rodadura asfáltica como lo es el de la vía San Lorencito – cruce Iscayachi, y ancho menor que 7,30 m, el área de la unidad de muestreo debe estar en el rango de $230 \pm 93 \text{ m}^2$, como se observa en la siguiente tabla que presenta relaciones de longitud – ancho de calzada pavimentada.

Tabla 3.1. Longitudes de unidades de muestreo asfáltico

Ancho de calzada (m)	Longitud de muestreo asfáltico(m)
5,00	46,00
5,50	41,80
6,00	38,30
6,50	35,40
7,30 (máx.)	31,50

Fuente: Pavement condición index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concretos en carreteras, traducido por el ing. Luis Ricardo Vásquez, abril 2006.

En función a las medidas tomadas del ancho de calzada en el tramo “San Lorencito – cruce Iscayachi” que es de 7,00 m, se adoptó una longitud de 32 m. para cada una de las áreas. Llegando a ser la unidad de muestra de 224 m^2 que está dentro del rango establecido por el método.

Se debe realizar una pre visualización inicial de la vía para tener un criterio de división de los tramos. Para tener una mejor precisión de la evaluación superficial por el método PCI, se realizó una división de todo el tramo por secciones de 2 km y uno de 1 km, para poder obtener así un PCI por kilómetro de vía, debido a la discontinuidad de uniformidad de daño en la vía. Todas las unidades de muestra de la sección pueden ser inspeccionadas para determinar el valor de PCI promedio en la sección. Este tipo de análisis es ideal para una mejor estimación del mantenimiento y reparaciones necesarias por kilómetro de carretera.

Para obtener el número mínimo de unidades de muestra se tiene los siguientes datos:

Para las progresivas 0+000 a 10+000

Ancho de vía = 7,00 m

Longitud de muestreo = 32 m

Longitud de sección = 2000 m

$$N = \frac{\textit{Longitud de sección}}{\textit{Longitud de muestreo}}$$

$$N = \frac{2000}{32} = 62,5 \Rightarrow N = 63$$

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

Donde:

N=63 (Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento)

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

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

$$n = \frac{63 * 10^2}{\frac{5^2}{4} * (63 - 1) + 10^2} = 12,92 \Rightarrow 13 \textit{ Unidades de muestra}$$

Intervalo de muestreo (i):

$$i = \frac{N}{n} = \frac{63}{13} = 4,85 \Rightarrow \textit{cada 4 unidades}$$

Tabla 3.2. Muestras seleccionadas para el pci prog. 0+000 – 10+000

Sección 1			Sección 2		
Prog. inicial	Prog. final	Unidad de muestra	Prog. inicial	Prog. final	Unidad de muestra
0+096	0+128	U4	2+096	2+128	U4
0+224	0+256	U8	2+224	2+256	U8
0+352	0+384	U12	2+352	2+384	U12
0+480	0+512	U16	2+480	2+512	U16
0+608	0+640	U20	2+608	2+640	U20
0+736	0+768	U24	2+736	2+768	U24
0+864	0+896	U28	2+864	2+896	U28
0+992	1+024	U32	2+992	3+024	U32
1+120	1+152	U36	3+120	3+152	U36
1+248	1+280	U40	3+248	3+280	U40
1+376	1+408	U44	3+376	3+408	U44
1+504	1+536	U48	3+504	3+536	U48
1+632	1+664	U52	3+632	3+664	U52
1+760	1+792	U56	3+760	3+792	U56
1+888	1+920	U60	3+888	3+920	U60

Sección 3			Sección 4		
Prog. inicial	Prog. final	Unidad de muestra	Prog. inicial	Prog. final	Unidad de muestra
4+096	4+128	U4	6+096	6+128	U4
4+224	4+256	U8	6+224	6+256	U8
4+352	4+384	U12	6+352	6+384	U12
4+480	4+512	U16	6+480	6+512	U16
4+608	4+640	U20	6+608	6+640	U20
4+736	4+768	U24	6+736	6+768	U24
4+864	4+896	U28	6+864	6+896	U28
4+992	5+024	U32	6+992	7+024	U32
5+120	5+152	U36	7+120	7+152	U36
5+248	5+280	U40	7+248	7+280	U40
5+376	5+408	U44	7+376	7+408	U44
5+504	5+536	U48	7+504	7+536	U48
5+632	5+664	U52	7+632	7+664	U52
5+760	5+792	U56	7+760	7+792	U56
5+888	5+920	U60	7+888	7+920	U60

Fuente: Elaboración propia.

Sección 5		
Prog. inicial	Prog. final	Unidad de muestra
8+096	8+128	U4
8+224	8+256	U8
8+352	8+384	U12
8+480	8+512	U16
8+608	8+640	U20
8+736	8+768	U24
8+864	8+896	U28
8+992	9+024	U32
9+120	9+152	U36
9+248	9+280	U40
9+376	9+408	U44
9+504	9+536	U48
9+632	9+664	U52
9+760	9+792	U56
9+888	9+920	U60

Para la progresiva 10+000 a 11+000

Ancho de vía = 7,00 m

Longitud de muestreo = 32 m

Longitud de sección = 1000 m

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

$$N = \frac{1000}{32} = 31,25 \Rightarrow N = 32$$

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

Donde:

N=32 (Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento)

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

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

$$n = \frac{32 * 10^2}{\frac{5^2}{4} * (32 - 1) + 10^2} = 10,89 \Rightarrow 11 \text{ Unidades de muestra}$$

Intervalo de muestreo (i):

$$i = \frac{N}{n} = \frac{32}{11} = 2,90 \Rightarrow \text{Cada 3 unidades}$$

Tabla 3.3. Muestras seleccionadas para el pci prog. 10+000 - 11+000

Sección 6		
Prog. inicial	Prog. final	Unidad de muestra
10+064	10+096	U3
10+160	10+192	U6
10+256	10+288	U9
10+352	10+384	U12
10+448	10+480	U15
10+544	10+576	U18
10+640	10+672	U21
10+736	10+768	U24
10+832	10+864	U27
10+928	10+960	U30

Fuente: Elaboración propia.

La unidad de muestreo inicial se selecciona al azar, como lo indica el método.

➤ **Procedimiento del índice de condición de pavimento (PCI)**

Se inspecciona minuciosamente cada una de las unidades de muestreo para medir el tipo, cantidad y severidad de las fallas de acuerdo con el manual de daños del método PCI, se deben conocer y seguir estrictamente las definiciones y procedimientos de medida de los daños.

Los datos se registran en una planilla para cada unidad de muestreo, debiendo registrarse el tipo de falla, su extensión y severidad. A continuación, se muestra un modelo de la planilla usada para la recolección de datos.

Figura 3.3. Medición de fallas superficiales



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4. Planilla de recolección de datos para el pci

TIPOS DE FALLAS PARA PAVIMENTO FLEXIBLE						
1. Piel de cocodrilo	m ²	11. Parche				m ²
2. Exudación	m ²	12. Agregado pulido				m ²
3. Fisuramiento en bloque	m ²	13. Baches				m ²
4. Desniveles localizados	m ²	14. Cruce de ferrocarril				m ²
5. Corrugación	m ²	15. Ahuellamiento				m ²
6. Depresión	m ²	16. Desplazamiento				m ²
7. Fisuramiento en borde	m	17. Fisura de resbalamiento				m ²
8. Fisuramiento de reflexión	m	18. Hinchamiento				m ²
9. Desnivel carril/espaldón	m ²	19. Desmoronamiento / Intemperismo				m ²
10. Fisuras long. y/o transv.	m	<i>Severidad: b= Baja m= Media a= Alta</i>				
Área de evaluación = 224 m ²						
INVENTARIO DE FALLAS EXISTENTES						
Falla	Unidad	Severidad	Largo (m)	Ancho (m)	Prof. (m)	Total
Exudación	m ²	m	11,3	0,6		6,78
Depresión	m ²	a	15	7,3		109,5
Bache	m ²	m	3,1	1,8		5,58
Ahuellamiento	m ²	m	12	0,6		7,2
Piel de cocodrilo	m ²	a	0,8	1,2		0,96
Desprendimiento de agregados	m ²	b	17	7,5		127,5

Fuente: Elaboración propia.

➤ **Procedimiento de cálculo**

Para el cálculo del PCI debe seguirse el siguiente procedimiento: Deben totalizarse cada uno de los tipos de falla y su severidad y registrarlos en las casillas correspondientes. Los daños pueden ser medidos en área o longitud según el tipo de falla.

Para la obtención de la densidad se debe dividir cada uno de los daños en cada nivel de severidad entre el área de la unidad de muestreo en la que se trabaja, esta densidad se expresa en porcentaje, se aplica usando la siguiente ecuación como ejemplo de la unidad 48 (progresivas 1+504 a 1+536):

$$Densidad = \frac{Area\ total\ dañada\ (tipo\ y\ severidad)}{Area\ de\ la\ unidad\ de\ muestreo} \times 100$$

$$Densidad = \frac{6,78}{224} \times 100$$

$$Densidad = 1,08\%$$

Para determinar el valor deducido (DV) para cada combinación de tipo de falla y nivel de severidad utilizando las curvas de valor deducido de fallas normadas que se encuentran en el anexo.

Tabla 3.5. Cálculo de densidad y valores deducidos por fallas

Valores deducidos de fallas existentes					
Falla	Unidad	Severidad	Total	Densidad %	VD
Exudación (m)	m ²	m	6,78	1,08	2
Depresión (a)	m ²	a	109,5	17,38	56
Bache (m)	m ²	m	5,58	0,89	30
Ahuellamiento (m)	m ²	m	7,2	1,14	21
Piel de cocodrilo (a)	m ²	a	0,96	0,15	15
Desprendimiento de agregados (b)	m ²	b	127,5	20,24	8
					m = 5,04
					q = 6

Fuente: Elaboración propia

Luego crear una lista de valores deducidos individuales en orden descendente. Por ejemplo, en la tabla esta lista será 56,30, 21, 15 8 y 2.

Determinar el número de deducciones permisibles, “m”, empleando la ecuación:

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

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. (Ejemplo =56)

(Por ejemplo, en la tabla 3.5, $m = 1 + (9/98) (100 - 56) = 5,04$).

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.

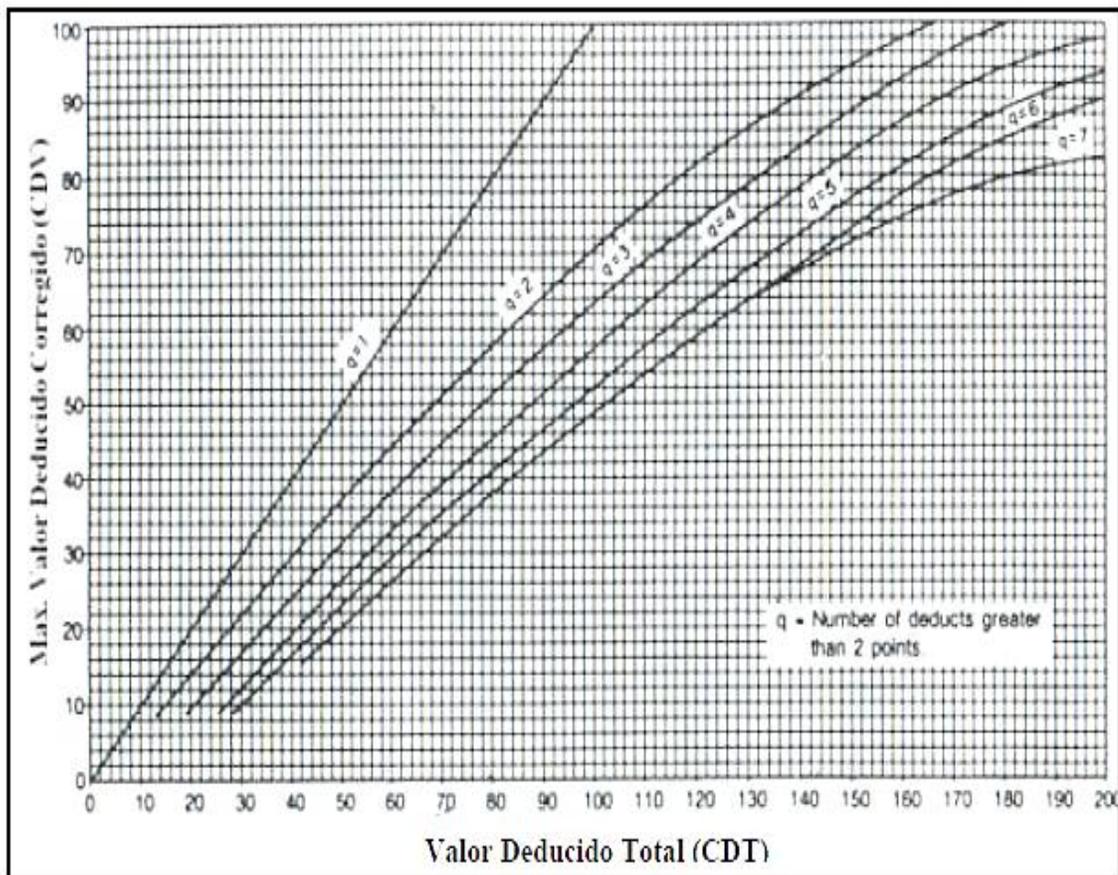
Para determinar “q” como el número de valores deducidos mayores a 2. Por ejemplo, en la tabla anterior q=6.

Luego se determina el máximo valor deducido corregido (CDV), mediante los pasos:

Si ninguno o solamente un valor deducido es mayor que dos. El valor total es usado en lugar de CDV para determinar el PCI; de otro modo, el máximo CDV debe ser determinado usando el procedimiento descrito en los siguientes puntos.

Reducir a 2 el menor valor deducido individual mayor que 2 y repetir el procedimiento hasta que “q” sea igual a 1.

Gráfico 3.1. Curvas de corrección del valor deducido para pavimentos asfálticos.



Fuente: Procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en camino y estacionamientos ASTM D6433-03.

Con el anterior gráfico se determinan los valores máximos deducidos corregidos CDV para cada Q, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.6. Cálculo del pci en un pavimento flexible

Valores deducidos						CDT	Q	CDV
56	30	21	15	8	2	132	6	64
56	30	21	15	8	2	132	5	68
56	30	21	15	2	2	126	4	71
56	30	21	2	2	2	113	3	70
56	30	2	2	2	2	94	2	67
56	2	2	2	2	2	66	1	66

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente determinar el valor deducido máximo (HDV) de los valores deducidos individuales. El valor deducido total será 71, y el PCI se calcula con la siguiente fórmula:

$$PCI = 100 - HDV$$

$$PCI = 100 - 71$$

$$PCI = 29$$

Se compara el estado de la sección según la tabla siguiente.

Tabla 3.7. Índice de condición del pavimento (pci) y escala de graduación

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: Procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en camino y estacionamientos ASTM D6433-03.

Por lo tanto, el resultado parcial de la unidad 48 es:

Tabla 3.8. Resultado pci (unidad 48)

HDV	71
PCI	29
Clasificación	Malo

Fuente: Elaboración propia

➤ **Resultados PCI por sección**

Tabla 3.9. Resultados pci progresivas 0+000 a 2+000

Sección 1				
Unidad de muestreo	Progresiva inicial	Progresiva final	Valor del PCI	Calificación
4	0+096	0+128	25,00	Malo
8	0+224	0+256	30,00	Malo
12	0+352	0+384	23,00	Muy malo
16	0+480	0+512	27,00	Malo
20	0+608	0+640	20,00	Muy malo
24	0+736	0+768	21,00	Muy malo
28	0+864	0+896	25,00	Malo
A1	0+900	0+944	20,00	Muy malo
32	0+992	1+024	23,00	Muy malo
36	1+120	1+152	31,00	Malo
40	1+248	1+280	25,00	Malo
A2	1+280	1+312	17,00	Muy malo
44	1+376	1+408	33,00	Malo
48	1+504	1+536	29,00	Malo
52	1+632	1+664	30,00	Malo
56	1+760	1+792	23,00	Muy malo
60	1+888	1+920	21,00	Muy malo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.10. Resultados pci progresivas 2+000 a 4+000

Sección 2				
Unidad de muestreo	Progresiva inicial	Progresiva final	Valor del PCI	Calificación
4	2+096	2+128	30,00	Malo
8	2+224	2+256	25,00	Malo
12	2+352	2+384	21,00	Muy malo
A3	2+420	2+452	13,00	Muy malo
16	2+480	2+512	33,00	Malo
20	2+608	2+640	20,00	Muy malo
24	2+736	2+768	23,00	Muy malo
28	2+864	2+896	30,00	Malo
32	2+992	3+024	29,00	Malo
A4	3+024	3+056	14,00	Muy malo
36	3+120	3+152	33,00	Malo
40	3+248	3+280	25,00	Malo
44	3+376	3+408	24,00	Muy malo
48	3+504	3+536	27,00	Malo
52	3+632	3+664	20,00	Muy malo
56	3+760	3+792	19,00	Muy malo
60	3+888	3+920	31,00	Malo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.11. Resultados pci progresivas 4+000 a 6+000

Sección 3				
Unidad de muestreo	Progresiva inicial	Progresiva final	Valor del PCI	Calificación
4	4+096	4+128	31,00	Malo
8	4+224	4+256	36,00	Malo
12	4+352	4+384	24,00	Muy malo
A5	4+410	4+442	20,00	Muy malo
16	4+480	4+512	28,00	Malo
20	4+608	4+640	26,00	Malo
24	4+736	4+768	19,00	Muy malo
A6	4+780	4+812	22,00	Muy malo
28	4+864	4+896	33,00	Malo
32	4+992	5+024	31,00	Malo
36	5+120	5+152	20,00	Muy malo
40	5+248	5+280	26,00	Malo
44	5+376	5+408	24,00	Muy malo
48	5+504	5+536	24,00	Muy malo
A7	5+550	5+582	12,00	Muy malo
52	5+632	5+664	20,00	Muy malo
56	5+760	5+792	22,00	Muy malo
60	5+888	5+920	19,00	Muy malo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.12. Resultados pci progresivas 6+000 a 8+000

Sección 4				
Unidad de muestreo	Progresiva inicial	Progresiva final	Valor del PCI	Calificación
4	6+096	6+128	22,00	Muy malo
8	6+224	6+256	28,00	Malo
12	6+352	6+384	29,00	Malo
16	6+480	6+512	26,00	Malo
20	6+608	6+640	26,00	Malo
24	6+736	6+768	22,00	Muy malo
A8	6+770	6+802	17,00	Muy malo
28	6+864	6+896	21,00	Muy malo
32	6+992	7+024	29,00	Malo
36	7+120	7+152	22,00	Muy malo
A9	7+154	7+186	21,00	Muy malo
40	7+248	7+280	23,00	Muy malo
44	7+376	7+408	24,00	Muy malo
48	7+504	7+536	28,00	Malo
52	7+632	7+664	22,00	Muy malo
56	7+760	7+792	31,00	Malo
60	7+888	7+920	23,00	Muy malo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.13. Resultados pci progresivas 8+000 a 10+000

Sección 5				
Unidad de muestreo	Progresiva inicial	Progresiva final	Valor del PCI	Calificación
4	8+096	8+128	45,00	Regular
8	8+224	8+256	30,00	Malo
12	8+352	8+384	29,00	Malo
16	8+480	8+512	22,00	Muy malo
20	8+608	8+640	27,00	Malo
A10	8+640	8+672	20,00	Muy malo
24	8+736	8+768	25,20	Malo
28	8+864	8+896	27,00	Malo
32	8+992	9+024	25,50	Malo
36	9+120	9+152	47,00	Regular
40	9+248	9+280	24,00	Muy malo
A11	9+280	9+312	22,00	Muy malo
44	9+376	9+408	25,00	Malo
48	9+504	9+536	23,00	Muy malo
52	9+632	9+664	22,00	Muy malo
56	9+760	9+792	21,00	Muy malo
60	9+888	9+920	33,00	Malo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.14. Resultados pci progresivas 10+000 a 11+000

Sección 6				
Unidad de muestreo	Progresiva inicial	Progresiva final	Valor del PCI	Calificación
3	10+064	10+096	24,00	Muy malo
6	10+160	10+192	38,00	Malo
9	10+256	10+288	25,00	Malo
12	10+352	10+384	27,00	Malo
A12	10+384	10+416	16,00	Muy malo
15	10+448	10+480	38,40	Malo
18	10+544	10+576	44,00	Regular
21	10+640	10+672	41,00	Regular
A13	10+672	10+704	18,00	Muy malo
24	10+736	10+768	26,00	Malo
27	10+832	10+864	22,00	Muy malo
30	10+928	10+960	33,00	Malo

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Determinación del índice de regularidad internacional (IRI)

Para la determinación del IRI, se realizó por el equipo rugosímetro de MERLIN y a sí mismo para verificar algunos subtramos más relevantes se determinó por el método

tradicional de nivel y mira topográfica (clase I), el cual para este último solo se realizó una sola verificación dentro del tramo de estudio.

➤ **Método dispositivo basado en el equipo de MERLIN**

Para la ejecución de los ensayos se requiere de dos personas que trabajan conjuntamente, un operador que conduce el equipo y realiza las lecturas y un auxiliar que las anota. Asimismo, 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 3.4. Ejecución del ensayo, operador y auxiliar



Fuente: Elaboración propia

Para determinar un valor de rugosidad se deben efectuar 200 observaciones de las “irregularidades que presenta el pavimento “cada una de las cuáles 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 2m 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.

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

La posición que adopta el puntero corresponderá a una lectura entre 1 y 50, la que se anotará 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 y de izquierda a derecha.

La prueba empieza estacionando el equipo al inicio del tramo de ensayo, el operador espera que el puntero se estabilice y observa la posición que adopta respecto de la escala colocada sobre el tablero, realizando así la lectura que es anotada por el auxiliar.

Figura 3.5. Lectura y toma de datos con el equipo Merlín



Fuente: Elaboración propia

Paso seguido, el operador toma el instrumento por las manijas, elevándolo y desplazándolo la distancia constante seleccionada para usarse entre un ensayo y otro (una vuelta de la rueda). En la nueva ubicación se repite la operación explicada y así sucesivamente hasta completar las 200 lecturas.

Figura 3.6. Operador eleva el equipo Merlín a una distancia constante



Fuente: Elaboración propia

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, para lo cual se pone una señal o marca llamativa sobre la llanta la que debe quedar siempre en contacto con el piso. Ello facilita la labor del operador quién, una vez hecha la lectura, levanta el equipo y controla que la llanta gire una vuelta haciendo coincidir nuevamente la marca sobre el piso.

Para el cálculo es necesario contar con los datos de entrada los cuales se obtienen a partir de las lecturas en cada tramo.

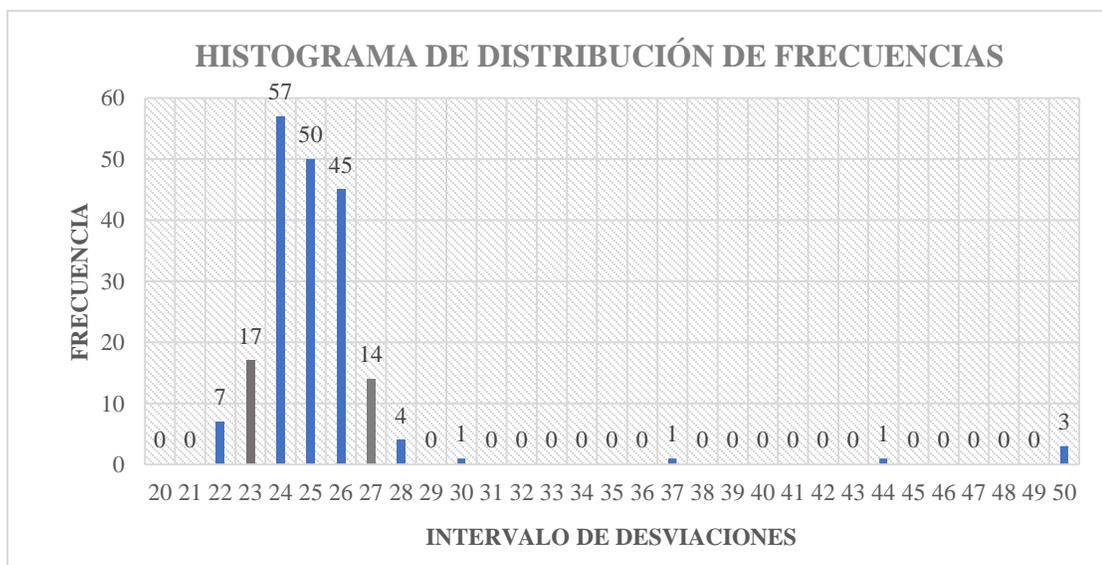
Tabla 3.15. Datos de campo con la rueda de Merlín

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	24	24	24	25	24	50	24	24	25	24
2	23	26	25	25	23	50	25	25	24	24
3	22	25	25	26	24	25	25	25	26	24
4	22	25	25	24	24	26	24	25	25	27
5	26	26	24	27	25	24	24	26	24	23
6	24	27	24	27	26	22	24	25	25	27
7	24	24	25	26	25	23	25	26	26	23
8	26	27	26	22	24	28	26	26	27	24
9	25	25	26	22	24	37	50	24	24	24
10	23	25	24	24	24	26	44	24	26	23
11	25	25	24	26	26	26	27	25	26	24
12	26	28	26	25	28	24	26	23	24	24
13	22	24	23	25	24	25	26	25	24	26
14	26	25	26	26	26	24	23	25	24	25
15	25	25	23	27	23	24	27	27	27	26
16	23	23	25	30	24	24	26	25	24	24
17	26	25	25	26	26	22	23	25	26	24
18	25	25	25	25	25	26	24	26	24	26
19	26	23	26	24	27	25	25	26	27	26
20	25	24	25	26	24	28	24	24	24	23

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos se determina un histograma, donde la frecuencia refleja el número de veces que se repite la misma lectura, como se observa en el siguiente gráfico:

Gráfico 3.2. Se realiza el histograma de los datos recolectados



Fuente: Elaboración propia

En el histograma de frecuencias se desprecia el 10 % de los datos, 5% del lado derecho y el 5% del lado izquierdo, donde la sumatoria nos da 10 datos, para ello se realiza la siguiente tabla de frecuencias para la depuración de datos:

Tabla 3.16. Frecuencias obtenidas del histograma de datos Merlín

Superior izq. =	17
Existente izq. =	7
Faltante izq. =	3
Superior der. =	14
Existente der. =	10
Faltante der. =	0
Di =	3

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos se procede a realizar el cálculo respectivo:

Cálculo del rango D:

$$D = \left(\frac{(17 - 3)}{17} + 3 + \frac{(14 - 0)}{14} \right) * 1[mm] * 5$$

$$\mathbf{D= 20,55 \text{ mm.}}$$

Cálculo factor de corrección fc:

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

$$\mathbf{Fc=0,827 \text{ mm.}}$$

Donde:

$$E_p = 6.2$$

$$L_i = 25$$

$$L_f = 10$$

Cálculo del rango corregido Dc:

$$D_c = D * f_c * 5$$

$$\mathbf{Dc= 84,92 \text{ mm.}}$$

Determinación del I.R.I.:

- Para pavimentos nuevos:

$$\text{I.R.I.} = 0,0485 * D_c \quad (\text{IRI} < 2,4)$$

- Para pavimentos en servicio:

$$\text{I.R.I.} = 0,593 + 0,0471 * D_c \quad (2,4 < \text{IRI} < 15,9)$$

Aplicando la fórmula para pavimentos en servicio:

$$\text{I.R.I.} = 0,593 + 0,0471 * D_c$$

$$\text{I.R.I.} = 4,08 \text{ m/km}$$

➤ Resultados IRI por kilómetro

Los resultados finales obtenidos para cada kilómetro en estudio son:

Tabla 3.17. Resultados IRI por kilómetro

Progresiva		IRI
Inicial	Final	m/Km
0+000	1+000	4,08
1+000	2+000	4,36
2+000	3+000	4,90
3+000	4+000	4,80
4+000	5+000	3,75
5+000	6+000	3,03
6+000	7+000	4,54
7+000	8+000	4,44
8+000	9+000	4,18
9+000	10+000	4,70
10+000	11+000	2,89

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Determinación del índice de serviciabilidad presente (PSI)

El índice de serviciabilidad presente se calcula a partir de los resultados obtenidos por el IRI.

Para determinar los valores del PSI, se hizo el uso de dos ecuaciones que lo correlacionan con el IRI, siendo las más notables la fórmula de Paterson y Dujisin & Arroyo y puesto

que ningún valor se encuentra por debajo de 0,47 m/km, no se tuvo en cuenta la ecuación de Gillespie.

Se muestra el ejemplo del punto de ensayo en la progresiva 5+000 a 6+000.

Según Paterson:

$$PSI = 5 * e^{-0,18*IRI}$$

$$PSI = 5 * e^{-0,18*3,03}$$

$$PSI = 2,90$$

Según Dujisin & Arroyo (Chile 1995):

$$PSI = 5,85 - (1,68 * IRI^{0,50})$$

$$PSI = 5,85 - (1,68 * 3,03^{0,50})$$

$$PSI = 2,92$$

En la tabla se observan los resultados de ambos métodos, los resultados obtenidos son similares, por lo cual haciendo una previa visualización de los resultados obtenidos en las demás progresivas se tomó en cuenta solo el método de Paterson, por ser la más rigurosa en cuanto al resultado.

A continuación, se muestran un resumen de los resultados obtenidos del PSI según la fórmula anteriormente vista de Paterson.

Tabla 3.18. Resultados PSI por kilometro

Progresiva		IRI	PSI
Inicial	Final	m/Km	Paterson
0+000	1+000	4,08	2,4
1+000	2+000	4,36	2,28
2+000	3+000	4,9	2,07
3+000	4+000	4,8	2,11
4+000	5+000	3,75	2,54
5+000	6+000	3,03	2,90
6+000	7+000	4,54	2,21
7+000	8+000	4,44	2,25
8+000	9+000	4,18	2,36
9+000	10+000	4,7	2,14
10+000	11+000	2,89	2,97

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4. Determinación de la Macrotextura con la mancha de arena

Para determinar la macrotextura del pavimento se aplicó el método del círculo o mancha de arena, realizando el siguiente procedimiento de ensayo:

Se comenzó de la progresiva 0+000. El ensayo se realizó en ambos carriles cada 250 metros, efectuándolo en la huella externa de cada carril. El procedimiento fue el siguiente: Con todo el material necesario se comenzó el ensayo, se introdujo 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 ayuda de un cepillo de cerdas finas y platicas, una vez limpio con ayuda del embudo se vació la arena en el pavimento, a continuación, con ayuda del disco esparcidor se esparció la arena formando un círculo hasta que se cubrió completamente el sector y quedo sin bordes. Se prosiguió a medir 5 diámetros y a registrarlos en la planilla. Este procedimiento se lo realizado a lo largo de toda la vía.

Figura 3.7. Realización de la práctica de la mancha de arena



Fuente: Elaboración propia.

➤ Procedimiento de cálculo

Para el ensayo del círculo de arena se midieron cinco diámetros por cada ensayo. Primeramente, se realiza 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 que es de $V=25000 \text{ mm}^3$.

Cálculos por progresiva:

El ejemplo que se muestra es de la progresiva 3+250.

Comenzamos obteniendo el promedio de los cinco diámetros obtenidos:

$$\text{Promedio} = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5}{5}$$
$$\text{Promedio} = \frac{260 + 270 + 240 + 280 + 270}{5}$$
$$\text{Promedio} = 264 \text{ mm}$$

Calculamos el promedio de profundidad de Macrotextura:

$$\text{MTD} = \frac{4 * V}{\pi * D^2}$$
$$\text{MTD} = \frac{4 * 25000}{\pi * 264^2}$$
$$\text{MTD} = 0,46 \text{ mm}$$

Resultados por parciales por ensayo realizado:

Tabla 3.19. Resultado de la macrotextura de la progresiva, ejemplo.

Progresiva	Diámetro de los círculos (mm)					Promedio	MTD
	1	2	3	4	5		
3+250	260	270	240	280	270	264,00	0,46

Fuente: Elaboración propia.

Como el estudio se realizó cada 250 m, entonces cada 4 datos se determina un promedio, el cual es el resultado de la progresiva en estudio, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 3.20. Resultados de la macrotextura

Prog. inicial	Prog. final	MTD (mm) Ida	MTD (mm) Vuelta
0+000	1+000	0,49	0,43
1+000	2+000	0,33	0,45
2+000	3+000	0,46	0,56
3+000	4+000	0,33	0,32
4+000	5+000	0,34	0,38
5+000	6+000	0,30	0,48
6+000	7+000	0,30	0,31
7+000	8+000	0,51	0,39
8+000	9+000	0,47	0,39
9+000	10+000	0,46	0,32
10+000	11+000	0,50	0,45

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5. Determinación de la microtextura con el péndulo británico

Para determinar la microtextura, se procede a ensayar la superficie del pavimento con el equipo Péndulo Británico, el cual proporciona una resistencia al patinaje de acuerdo al grado de pulidez del pavimento.

➤ Procedimiento del ensayo

Como en la anterior practica se comenzó de la misma progresiva 0+000. El ensayo se realizó en ambos carriles cada 250 metros, efectuándolo en la huella externa de cada carril. Con el equipo en el lugar y con ayuda del personal de laboratorio se procedió a su armado. Una vez colocado en el sitio elegido se realizó la nivelación con guía del nivel de burbuja que tiene. También colocamos el termómetro en el suelo cerca del péndulo, pero sin que perjudique al equipo. Una vez nivelado se procedió a medir la longitud de rose de la zapata con ayuda del tornillo superior hasta lograr la longitud que nos indica la regla del equipo.

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 rocío con agua el sector del suelo donde oscilaría, colocando la aguja indicadora en cero siguiendo presionamos el pulsador que suelta el brazo del péndulo para que oscile.

Realizamos la lectura y anotación del ángulo de oscilación que nos indica el panel. Realizamos este mismo procedimiento 5 veces obteniendo 5 lecturas. En caso de que dos o más BPN difiera más de 3 unidades se procede a volver a realizar las 5 mediciones consecutivas. Se concluyó con el ensayo realizando el registro de la temperatura del pavimento con el termómetro colocado a un inicio del ensayo.

Se realizaron 45 ensayos de ida y 45 ensayos de vuelta teniendo un total de 90 ensayos.

Figura 3.8. Preparando el péndulo británico para realizar el ensayo



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.9. Lectura de la resistencia al patinaje con el péndulo británico



Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizados los cálculos, se obtuvieron los siguientes resultados de microtextura:

Tabla 3.21. Resultados de la microtextura

Prog. inicial	Prog. final	RD (mm) Ida	RD (mm) Vuelta
0+000	1+000	0,88	0,97
1+000	2+000	0,85	0,88
2+000	3+000	0,87	0,93
3+000	4+000	0,66	0,78
4+000	5+000	0,84	0,90
5+000	6+000	0,86	0,81
6+000	7+000	0,86	0,87
7+000	8+000	0,87	0,82
8+000	9+000	0,87	0,81
9+000	10+000	0,84	0,81
10+000	11+000	0,85	0,83

Fuente: Elaboración propia.

3.3.6. Determinación del Índice de Fricción Internacional (I.F.I.)

La obtención de datos de campo para determinar el IFI, es a través de los ensayos del círculo de arena y el Péndulo Británico, los mismos que se usaron en el cálculo de la macro y micro textura respectivamente.

Se tomará como ejemplo la primera lectura de la progresiva 1+250 de ida de la vía de estudio.

Ensayo Círculo de Arena

Progr.	Diámetros (cm)				
1+250	32	28	28	29	31

Ensayo Péndulo de Fricción

Progr.	T °C	BPN (adim.)				
1+250	20	74	72	71	74	73

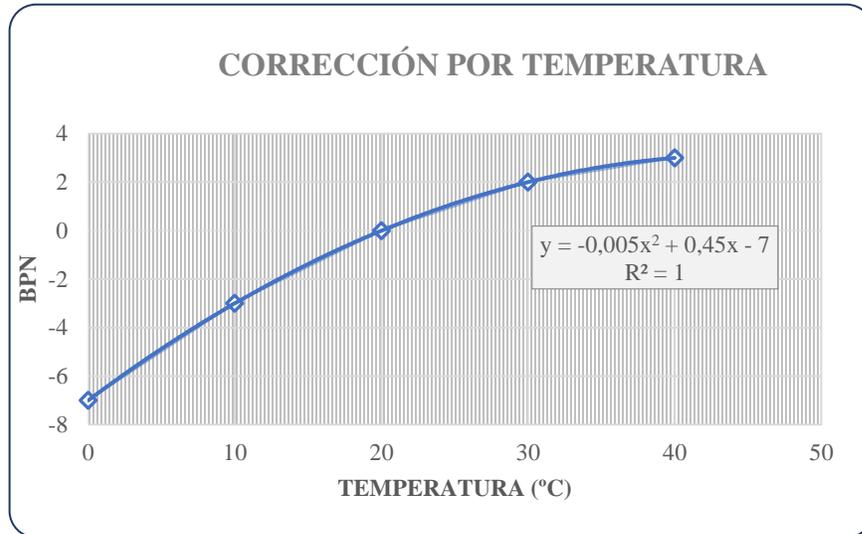
Fuente: Elaboración propia

➤ Corrección por temperatura de las lecturas realizadas con el péndulo de fricción

Se corrige por la temperatura usando la ecuación del gráfico. De acuerdo a los valores medidos del número de péndulo británico (BPN) a temperaturas establecidas en el manual del equipo. Estos valores estándares de temperatura hacen que la fricción varíe en función

del cambio de temperatura del pavimento, incrementando el valor de la fricción en caso de temperaturas elevadas y reduciendo el valor de la fricción en caso de temperaturas bajas.

Gráfico 3.2. Corrección por temperatura de la fricción



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.22. Datos de fricción corregidos por temperatura del pavimento

Progr.	T °C	Coef. De Corr.	BPN corregido (adim.)					Prom.	V (cm3)	Dp (cm)
1+250	20,00	0	74,00	72,00	71,00	74,00	73,00	72,80	25	29,60

Fuente: Elaboración propia

El valor corregido del péndulo de fricción es de 72,80 y el diámetro del círculo de arena es de 29,60 cm, el volumen utilizado para el ensayo del círculo de arena es de 25 cm³.

Luego de obtener los datos de entrada a partir de las lecturas en campo se debe seguir los siguientes puntos para obtener el valor de IFI a partir de los cálculos.

a) **Determinación de la textura media del pavimento, mediante la siguiente ecuación**

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

Donde:

H = Textura media del pavimento

V= Volumen de arena utilizado = 25000 mm³

D= 29,60 cm (dato obtenido del anterior punto correspondiente al tramo)

$$H = \left(\frac{4 \times 25 \text{ cm}^3}{\pi \times (29,60)^2} \right) \times 10 \frac{\text{mm}}{\text{cm}}$$

$$H = 0,363 \text{ mm}$$

b) Determinación de la constante “Sp”

$$\mathbf{Sp = a + b \times Tx}$$

Donde:

Sp = Constante de velocidad

Tx = H o altura de macrotextura del pavimento

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

Aplicando la ecuación se obtiene.

$$Sp = -11,5981 + 113,6325 \times 0,363$$

$$Sp = 29,65 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

c) Determinación del parámetro “F60”

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

Donde:

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

FRs = 72,80 (dato obtenido del anterior punto correspondiente al tramo 1)

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

Sp= Constante de velocidad (km/hr) = 29,65

$$FR60 = 72,80 \times e^{\left(\frac{10-60}{29,65}\right)}$$

$$FR60 = 13,48$$

Se prosigue con el cálculo de F60 con la siguiente ecuación:

$$F60 = A + B \times FR60$$

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.

$$F60 = 0,078 + 0,017 \times 13,48$$

$$F60 = 0,222$$

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

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

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)

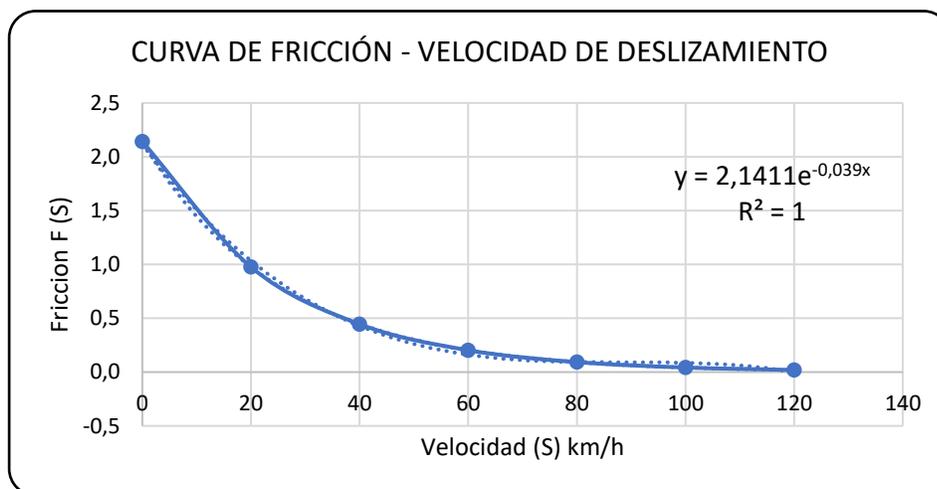
Tabla 3.23. Valores para graficar la curva " fricción vs velocidad"

S	0	20	40	60	80	100	120
	F(0)	F(20)	F(40)	F(60)	F(80)	F(100)	F(120)
F (S)	2,141	0,976	0,445	0,203	0,093	0,042	0,019

Fuente: Elaboración propia

Con esta tabla se determina la curva fricción según la velocidad de deslizamiento, como se observa en el siguiente gráfico:

Gráfico 3.3. Variación de la fricción en función de la velocidad



Fuente: Elaboración propia

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

Velocidad máxima segura:

$$V_{max} = 2,141 * e^{-0,039*0,373}$$

$$V_{max} = 44,81 \text{ km/h}$$

Velocidad máxima segura = 44,81 km/h

Por lo tanto, los resultados finales IFI por kilómetro ida y vuelta, son:

Tabla 3.24. Resultados del Índice de Fricción internacional (I.F.I.)

Progresiva inicial	Progresiva final	I.F.I. (Km/h)	
		Ida	Vuelta
00+000	01+000	59,78	54,94
01+000	02+000	44,81	54,61
02+000	03+000	51,88	67,94
03+000	04+000	41,10	42,22
04+000	05+000	44,76	49,16
05+000	06+000	42,75	53,61
06+000	07+000	42,43	43,70
07+000	08+000	57,98	47,57
08+000	09+000	55,29	47,39
09+000	10+000	54,31	43,47
10+000	11+000	58,52	54,70

Fuente: Elaboración propia

3.4. Evaluación estructural

La evaluación estructural se la realiza aplicando dos métodos, el método no destructivo y el método destructivo, como se desarrolla a continuación:

3.4.1. Método no destructivo con la viga Benkelman

Para la evaluación estructural con el método no destructivo, se hace uso del equipo viga Benkelman, cuyos datos proporcionan resultados de deflexiones máximas y radios de curvatura, los mismos que son comparados con requisitos de las normas.

➤ Procedimiento de la práctica

Este ensayo comenzamos con el pesaje de la volqueta a ser utilizada, una vez el en lugar se inició en la progresiva 0+000, realizando el ensayo cada 250 metros primeramente por el carril de ida y posteriormente por el carril de vuelta, el procedimiento fue el siguiente: Una vez armada la viga comenzamos con el ensayo, se realizó en la huella interna. Escogido el lugar se procedió a colocar el brazo móvil de la viga Benkelman entre las dos ruedas de la volqueta, cuando se encuentra seguro se indica que la volqueta comience su marcha lentamente. Las lecturas que se tomaron del extensómetro de la viga Benkelman fueron al inicio, a 50 cm, a 100 cm, a 150 cm, a 200 cm y a 500 cm.

Figura 3.10. Papeleta del pesaje de la volqueta

BALANZA "MENDOZA"
MATERIAL ALMACEN DEL 000000-00451178
Tarija - Bolivia

Nº 19177
Fecha 09/04/2022

Ingreso 09/04/2022 11:44:31 AM
Salida 09/04/2022 11:53:31 AM

BRUTO: 8.230
TARA: 0
NETO: 8.230

178.91 yg

Cliente Comprador YEFERSSON ZEBALLOS
Material GEAVA
Chofer ELIAS ROMERO
Vendedor NUZZ
Observación

Monte B: 200
Placa 134 TFF

BALANZA ELECTRÓNICA
"MENDOZA"
C.C. 73451178 - 6065877
Tarija - Bolivia

Fuente: Balanza electrónica Mendoza.

Figura 3.11. Calibración en 0 el del extensómetro digital de la viga Benkelman



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.12. Lectura de recuperación del pavimento cuando avanza la volqueta



Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos en campo, como se muestra en la siguiente tabla, se determinan los valores D_0 , D_{50} y RC , para luego corregir estos valores por temperatura del pavimento y altura de la carpeta asfáltica.

Tabla 3.25. Proceso de cálculo de Do y RC

(N°)	Progresiva (Km)	Lecturas del dial						Parámetros de evaluación		
		L-0cm 0.01 mm	L-50cm 0.01 mm	L-100cm 0.01 mm	L-150cm 0.01 mm	L-200cm 0.01 mm	L-500cm 0.01 mm	Do (0.01 mm)	D50 (0.01 mm)	RC (m)
1	00+000	0	4	4	4	12	14	14,00	10,00	781
2	00+250	0	4	6	6	8	16	16,00	12,00	781
3	00+500	0	6	4	6	8	14	14,00	8,00	521
4	00+750	0	4	6	8	10	18	18,00	14,00	781
5	01+000	0	6	4	6	8	16	16,00	10,00	521

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se determina la deflexión característica y el radio de curvatura característico del tramo en estudio (cada km).

Aplicando la fórmula:

$$D_c = D + t * D_s$$

Donde:

D =Deflexión recuperable promedio =	16,6
Ds = Desviación standard =	1,7
t = constante de probabilidad al 95% =	1,645

Tabla 3.26. Proceso de cálculo de Deflexiones y Radios de curvatura características

(N.º)	Progresiva (Km)	Parámetros de evaluación corregidos		
		Do' (0.01 mm)	D50' (0.01 mm)	RC' (m)
1	00+000	14,98	10,70	729,90
2	00+250	17,03	12,78	733,84
3	00+500	14,90	8,52	489,22
4	00+750	19,06	14,83	737,77
5	01+000	17,03	10,65	489,22
Número de muestras		5	5	5
Sumatoria		83,02	57,47	3179,95
Promedio		16,60	11,49	635,99
Deflexión mínima		14,90	8,52	489,22
Deflexión máxima		19,06	14,83	737,77
Desviación estándar		1,73	2,40	134,01
Varianza		2,98	5,74	17958,21

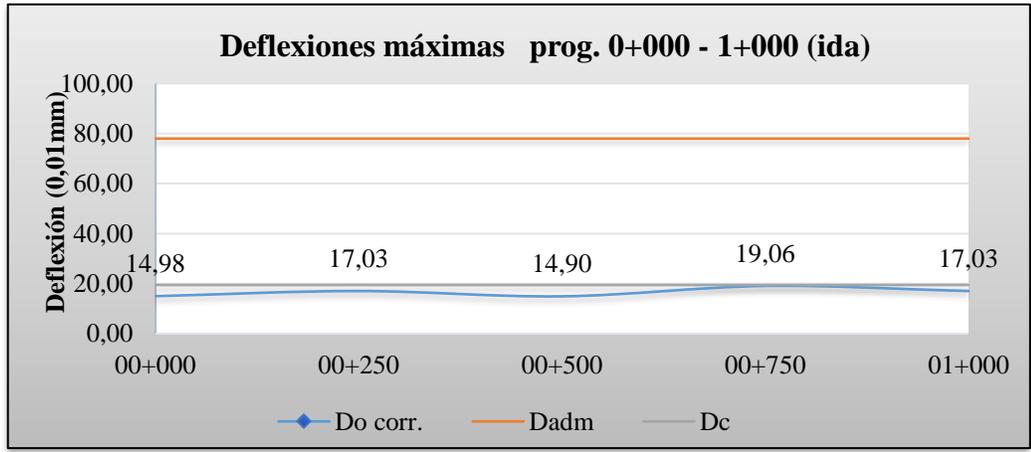
Coefficiente de variación	10,39	20,84	21,07
Valor característico	19,44	15,43	856,43

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto:

Dc = 19,44 x 10⁻² mm
RCc = 856,43 m

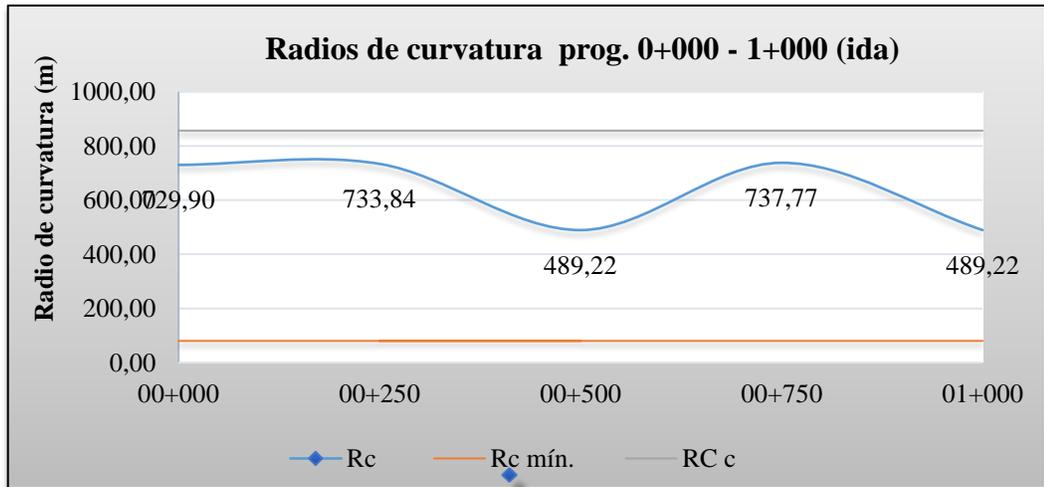
Gráfico 3.4. Deflexiones máximas del 0+000 al 1+000 ida



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 3.8. se observan las deflexiones máximas cada 250 m, que no superan la deflexión admisible.

Gráfico 3.5. Radios de curvatura del 0+000 al 1+000 ida



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 3.9., se observan los radios de curvatura cada 250 m, que superan el radio de curvatura mínimo de la norma igual a 80 m, por lo tanto sus resultados son aceptables.

Los resultados finales para cada progresiva de los sentidos ida y vuelta son:

Tabla 3.27. Resultados de deflexiones y radios de curvatura del tramo ida y vuelta

Progresiva inicial	Progresiva final	Dc (0,01 mm)		RC (m)	
		Ida	Vuelta	Ida	Vuelta
00+000	01+000	19,44	27,38	856,43	738,90
01+000	02+000	20,70	30,55	777,53	786,68
02+000	03+000	24,08	41,81	790,50	527,55
03+000	04+000	23,97	32,41	802,81	528,96
04+000	05+000	23,13	29,78	787,81	808,90
05+000	06+000	24,76	27,55	934,18	826,04
06+000	07+000	24,17	26,83	831,99	822,92
07+000	08+000	20,58	35,52	907,95	443,25
08+000	09+000	25,35	38,57	607,04	553,77
09+000	10+000	20,43	26,01	602,96	844,34
10+000	11+000	21,87	27,82	838,59	832,34

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Método destructivo con la extracción de núcleos

Como ya es de conocimiento el método destructivo, se lo realiza a través de la extracción de núcleos, realizando la extracción de un número limitado de núcleos en la vía el cual se detalla en el siguiente punto.

➤ Muestreo de núcleos

Se dividió la vía en secciones de 1 km y con ayuda del equipo de extracción de núcleos, se tomó dos muestras de núcleos por sección (carril derecho y carril izquierdo respectivamente). En total se tomaron 24 muestras de pavimento para la realización de los distintos ensayos.

Figura 3.13. Extracción de núcleo del pavimento



Fuente: Elaboración propia

Con las muestras obtenidas del campo se proceden a realizar los ensayos en laboratorio con la siguiente disposición de los núcleos extraídos:

Tabla 3.28. Disposición de los núcleos extraídos

N.º	Progresiva	Sentido	Ensayo realizado	N.º	Progresiva	Sentido	Ensayo realizado
1	0+000	Ida	Contenido de ligante y granulometría	13	11+000	Vuelta	Contenido de ligante y granulometría
2	1+000	Ida	Propiedades Marshall	14	10+000	Vuelta	Propiedades Marshall
3	2+000	Ida	Contenido de ligante y granulometría	15	9+000	Vuelta	Contenido de ligante y granulometría
4	3+000	Ida	Propiedades Marshall	16	8+000	Vuelta	Propiedades Marshall
5	4+000	Ida	Contenido de ligante y granulometría	17	7+000	Vuelta	Contenido de ligante y granulometría
6	5+000	Ida	Propiedades Marshall	18	6+000	Vuelta	Propiedades Marshall
7	6+000	Ida	Contenido de ligante y granulometría	19	5+000	Vuelta	Contenido de ligante y granulometría
8	7+000	Ida	Propiedades Marshall	20	4+000	Vuelta	Propiedades Marshall
9	8+000	Ida	Contenido de ligante y granulometría	21	3+000	Vuelta	Contenido de ligante y granulometría
10	9+000	Ida	Propiedades Marshall	22	2+000	Vuelta	Propiedades Marshall
11	10+000	Ida	Contenido de ligante y granulometría	23	1+000	Vuelta	Contenido de ligante y granulometría
12	11+000	Ida	Propiedades Marshall	24	0+000	Vuelta	Propiedades Marshall

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.1. Determinación de las propiedades Marshall

Las propiedades Marshall se dividen en dos partes: en propiedades físicas o volumétricas y en propiedades mecánicas, y se determinan de la siguiente manera:

- **Determinación de las propiedades físicas o volumétricas**

Al tratarse de núcleos extraídos, sólo es posible determinar la densidad real, ya que se desconocen los parámetros iniciales de diseño de la mezcla.

Primero se procede a medir las dimensiones, para ello se utilizó el instrumento de medida llamado vernier también conocido como pie de rey, en donde se realizó las medidas del espesor de cada muestra de núcleo, esto para la determinación del volumen de cada una.

Figura 3.14. Espesor de la muestra obtenida



Fuente: Elaboración propia.

Luego se procede a determinar los pesos en estado seco, superficialmente seco y sumergido de los núcleos extraídos con la ayuda de una balanza electrónica.

Figura 3.15. Pesaje de las muestras en seco



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se determina el peso superficialmente seco, para ello se prepara un baño María a 25°C, y luego se sumerge el núcleo por 5 min, pasado este tiempo se procede a retirar y realizar con un paso el secado superficial, posteriormente se toma el peso superficialmente seco.

Figura 3.16. Pesaje de las muestras superficialmente secas



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se determina el peso sumergido, se introduce el núcleo a un canasto se esté sumergido en un recipiente con agua y a la vez sujetado a una balanza en este caso mecánica, previamente calibrada en 0, y se lectura el peso sumergido del núcleo.

Figura 3.17. Pesaje de las muestras sumergidas en agua



Fuente: Elaboración propia.

- **Determinación de las propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas Marshall, son la estabilidad y fluencia. Para ello se procede a preparar las muestras introduciéndolas en un baño María a 60°C por 30 min ± 3 min, luego retirarlas del baño, realizar un secado superficial e introducirlo en la mordaza Marshall, para proceder a realizar la rotura de los núcleos. El extensómetro del anillo, determina la estabilidad, y el extensómetro de desplazamiento, sujetado con la mano, determina la fluencia.

Figura 3.18. Rotura de núcleos extraídos



Fuente: Elaboración propia.

➤ **Resultados obtenidos de las propiedades Marshall**

Según la tabla 3.35., los núcleos que se sometieron a la rotura para determinar las propiedades Marshall, son las de número par, tanto en sentido de ida como de vuelta, para ello, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.29. Datos y cálculos de las propiedades Marshall, sentido de ida.

Núcleo	Progresiva	Sentido	altura promedio de probeta	Peso seco	Peso Sat. Sup. Seca	Peso sumergido en agua	Volumen	Densidad	Estabilidad Marshall				Fluencia
									lectura del dial	Carga	factor de corrección	Estabilidad corregida	
Nº	Km	-	cm	gr	gr	gr	cm ³	gr/cm ₃	mm	libras	-	libras	0,01 pulg
2	1+000	ida	5,54	1140,8	1154,8	726	428,8	2,660	770	2055,23	1,26	2587,54	17
4	3+000	ida	5,61	1073,5	1171,2	790	381,2	2,816	883	2359,52	1,23	2904,57	18

6	5+000	ida	5,93	1141,9	1181,9	757	424,9	2,687	565	1503,21	1,12	1689,61	19	
8	7+000	ida	6,23	1179,1	1183,1	751	432,1	2,729	689	1837,12	1,03	1895,91	17	
10	9+000	ida	6,05	1082,6	1183,1	792	391,1	2,768	792	2114,48	1,09	2298,44	20	
12	11+000	ida	5,76	1197,0	1178,2	743	435,2	2,750	913	2440,31	1,18	2874,68	17	
Especificaciones		mínimo							2,300				1800	8
		máximo							-				-	16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.30. Datos y cálculos de las propiedades Marshall, sentido de vuelta.

Núcleo	Progresiva	Sentido	altura promedio de probeta	Peso seco	Peso Sat. Sup. Seca	Peso sumergido en agua	Volumen	Densidad	Estabilidad Marshall				Fluencia	
									lectura del dial	Carga	factor de corrección	Estabilidad corregida	lectura dial del flujo	
Nº	Km	-	cm	gr	gr	gr	cm ³	gr/cm ₃	mm	libras	-	libras	0,01 pulg	
14	10+000	vuelta	6,10	1105,9	1143,8	745	398,8	2,773	913	2440,31	1,07	2613,57	18	
16	8+000	vuelta	6,15	1132,2	1169,2	742	427,2	2,650	628	1672,86	1,06	1766,54	17	
18	6+000	vuelta	5,90	1112,7	1178,9	773	405,9	2,741	631	1680,94	1,13	1906,18	18	
20	4+000	vuelta	5,99	1155,4	1185,2	770	415,2	2,783	909	2429,53	1,11	2687,06	19	
22	2+000	vuelta	5,81	1092,5	1161,4	772	389,4	2,806	625	1664,78	1,16	1934,47	18	
24	0+000	vuelta	5,62	1162,2	1170,7	748	422,7	2,749	720	1920,59	1,23	2358,49	18	
Especificaciones		mínimo							2,300				1800	8
		máximo							-				-	16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.31. Resultados de las propiedades Marshall

N.º	Progresiva	Sentido	Densidad (gr/cm ³)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01")
2	1+000	Ida	2,660	2587,54	17
4	3+000	Ida	2,816	2904,57	18
6	5+000	Ida	2,687	1689,61	19
8	7+000	Ida	2,729	1895,91	17
10	9+000	Ida	2,768	2298,44	20
12	11+000	Ida	2,750	2874,68	17
14	10+000	Vuelta	2,773	2613,57	18
16	8+000	Vuelta	2,650	1766,54	17
18	6+000	Vuelta	2,741	1906,18	18
20	4+000	Vuelta	2,783	2687,06	19
22	2+000	Vuelta	2,806	1934,47	18
24	0+000	Vuelta	2,749	2358,49	18

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.2. Extracción centrífuga

Se procede a realizar el ensayo de extracción centrífuga con el uso de gasolina para que actúe como agente de lavaje o desintegración de la muestra y con el equipo de centrifugado se procedió a la separación del material ligante (asfalto) y el agregado.

Se procedió a la determinación del peso del agregado y así poder determinar el contenido de asfalto presente.

Figura 3.19. Separación del ligante y el agregado con el equipo de centrifugo



Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.3. Verificación granulométrica

Con el agregado suelto y con la ayuda de tamices normados para la granulometría de este tipo de ensayos, se realizó la granulometría correspondiente para las diferentes muestras y poder compararlas con la granulometría normada para las vías de asfalto.

Figura 3.20. Agregado obtenido luego del proceso de centrifugación



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.21. Ensayo de granulometría



Fuente: Elaboración propia.

➤ **Resultados obtenidos**

Los resultados finales de contenido de ligante y curva granulométrica, obtenidos de cada núcleo ensayado para los carriles de ida y vuelta, se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 3.32. Resultados finales de la extracción centrífuga

N.º	Progresiva	Sentido	Contenido de ligante (%)	Granulometría - Porcentaje que pasa:						
				1" 100-100 (%)	3/4" 90 - 100 (%)	3/8" 56 - 80 (%)	Nº 4 35 - 65 (%)	Nº 8 23 - 49 (%)	Nº 50 5 - 19 (%)	Nº 200 2 - 8 (%)
1	0+000	Ida	5,173	100,00	94,66	64,25	49,22	37,77	12,67	2,08
3	2+000	Ida	5,655	100,00	91,07	69,51	53,83	40,81	16,47	4,92
5	4+000	Ida	5,319	100,00	87,64	66,48	51,27	39,29	15,88	3,45
7	6+000	Ida	5,234	100,00	86,35	68,40	52,00	41,93	10,47	2,91

9	8+000	Ida	5,672	100,00	88,22	59,81	42,56	36,74	18,92	3,84
11	10+000	Ida	5,315	100,00	95,22	72,90	61,28	46,44	10,03	3,69
13	11+000	Vuelta	5,401	100,00	91,50	63,28	49,85	35,43	11,19	3,11
15	9+000	Vuelta	5,505	100,00	88,64	61,27	52,15	38,51	11,02	2,84
17	7+000	Vuelta	5,610	100,00	90,94	67,68	52,87	43,20	13,17	2,00
19	5+000	Vuelta	5,351	100,00	95,35	80,49	62,63	44,43	9,7	1,28
21	3+000	Vuelta	5,520	100,00	85,99	56,22	46,57	38,50	17,38	6,23
23	1+000	Vuelta	5,219	100,00	87,38	66,85	55,91	38,80	7,00	1,77

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.4. Calicata o pozo a cielo abierto

La calicata es un método destructivo para la evaluación de las capas de suelo que tiene la vía, por lo que al ser un método que compromete el estado de la vía, se extrajo material en un solo punto de la longitud total de proyecto.

Muestreo

Se determinó dos lugares en donde la carretera ya presentó daños en su capa de rodadura (progresiva 4+780, 8+332), esto para facilitar la extracción y no dañar más el estado de la vía. Con la ayuda de un pico y una pala se extrajeron las diferentes capas estructurales

Figura 3.22. Capas estructurales de la vía



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados finales de la evaluación superficial

Después de realizar una evaluación superficial a todo el tramo, a través de métodos que determinan el estado actual del pavimento, se obtiene el siguiente análisis de resultados para cada método estudiado.

4.1.1. Análisis de resultados por el método PCI

➤ Resultados PCI por kilómetro de la vía

En la siguiente tabla se determinaron los resultados por kilómetro de estudio y se compara el estado de la sección según la siguiente tabla:

Tabla 4.1. Índice de condición del pavimento (PCI) y escala de graduación

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: Procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en camino y estacionamientos ASTM D6433-03.

La tabla 4.1, expresa una escala de gradación de colores, que permite definir la severidad del daño al que se encuentra el pavimento flexible, esta simbología se la aplica a los resultados obtenidos por kilómetro del tramo en estudio.

Tabla 4.2. Calificación PCI por kilómetro del tramo

Índice de condición del pavimento con superficie asfáltica				
Progresivas		PCI	Calificación	Color
0+000	1+000	23,88	Muy Malo	
1+000	2+000	25,78	Malo	
2+000	3+000	24,38	Muy Malo	
3+000	4+000	24,67	Muy Malo	
4+000	5+000	26,56	Malo	
5+000	6+000	22,00	Muy Malo	
6+000	7+000	23,88	Muy Malo	
7+000	8+000	24,78	Muy Malo	
8+000	9+000	28,15	Malo	
9+000	10+000	26,94	Malo	
10+000	11+000	29,37	Malo	

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la evaluación del PCI por kilómetro, proporciona los siguientes resultados: 6 tienen calificación “*muy malo*” y 5 tienen calificación “*malo*”.

➤ **Resultados PCI por secciones de la vía**

En la siguiente tabla se observan los resultados por sección, cada 2 km de estudio.

Tabla 4.3. Calificación PCI por secciones del tramo

Índice de condición del pavimento					
Sección	Progresivas		PCI	Calificación	Color
1	0+000	2+000	24,88	Muy malo	
2	2+000	4+000	24,53	Muy malo	
3	4+000	6+000	24,28	Muy malo	
4	6+000	8+000	24,35	Muy malo	
5	8+000	10+000	27,51	Malo	
6	10+000	11+000	28,93	Malo	

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la evaluación del PCI por sección, determina que 4 tienen calificación “*muy malo*” y 2 tienen calificación “*malo*”.

➤ **Resultado PCI final del proyecto**

Promediando los resultados PCI, de la tabla 4.3, se obtiene un resultado final de todo el tramo, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 4.4. Calificación PCI del proyecto

Índice de condición del pavimento con superficie asfáltica				
Progresivas		PCI	Calificación	Color
0+000	11+000	25,75	Malo	

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se determina que todo el tramo en estudio tiene un PCI de 25,75, con calificación “**MALO**” y un color **rojo**, por lo tanto, significa que el tramo necesita de mantenimiento, para mitigar las fallas encontradas.

4.1.2. Análisis de resultados por el método IRI (Rueda de Merlín)

En la siguiente tabla se muestra el resumen de resultados IRI, que se determinaron con el equipo rueda de Merlín, que se analizaron los primeros 400 m por cada kilómetro, lo cual expresa 200 datos tabulados en las planillas para el cálculo del IRI. A partir de estos datos se obtuvieron los siguientes resultados finales.

Los resultados finales IRI obtenidos de todo el tramo se califican de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 4.5. Clasificación de rangos de regularidad.

Rango de Regularidad (m/km)	Calificación
0,0 – 2,0	Excelente
2,0 – 3,5	Bueno
3,5 – 5,0	Regular
> 5,0	Malo

Fuente: Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras.

Tabla 4.6. Calificación IRI por kilómetro

Progresiva		IRI	Calificación
Inicial	Final	m/Km	
0+000	1+000	4,08	Regular
1+000	2+000	4,36	Regular
2+000	3+000	4,90	Regular
3+000	4+000	4,80	Regular
4+000	5+000	3,75	Regular
5+000	6+000	3,03	Bueno
6+000	7+000	4,54	Regular
7+000	8+000	4,44	Regular
8+000	9+000	4,18	Regular
9+000	10+000	4,70	Regular
10+000	11+000	2,89	Bueno

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 4.6., los resultados IRI por kilómetro expresan 9 con calificación “*regular*” y 2 con una calificación “*bueno*”.

Luego a partir de los resultados IRI por kilómetro, se saca un promedio y se determina el IRI de todo el tramo en estudio, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 4.7. Calificación IRI del proyecto

Progresiva		IRI	Calificación
Inicial	Final	m/Km	
0+000	11+000	4,15	Regular

Fuente: Elaboración propia.

Observando la tabla 4.7., el resultado final IRI determina que el tramo en estudio obtiene una calificación de “*REGULAR*”.

4.1.3. Análisis de resultados por el método PSI

Los resultados obtenidos del PSI, fueron determinados a partir de los resultados IRI, determinados con la ecuación de Paterson de cada kilómetro en estudio, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.8. Calificación PSI por kilómetro

Progresiva		IRI	PSI	Calificación
Inicial	Final	m/Km	Paterson	
0+000	1+000	4,08	2,4	Regular
1+000	2+000	4,36	2,28	Regular
2+000	3+000	4,9	2,07	Regular
3+000	4+000	4,8	2,11	Regular
4+000	5+000	3,75	2,54	Regular
5+000	6+000	3,03	2,90	Regular
6+000	7+000	4,54	2,21	Regular
7+000	8+000	4,44	2,25	Regular
8+000	9+000	4,18	2,36	Regular
9+000	10+000	4,7	2,14	Regular
10+000	11+000	2,89	2,97	Regular

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.8. se observa que los resultados PSI, proporcionan una calificación uniforme de “*regular*” en todo el tramo de estudio.

Luego a partir de los resultados PSI por kilómetro, se saca un promedio y se determina el PSI de todo el tramo en estudio, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 4.9. Calificación PSI del proyecto

Progresiva		IRI	PSI	Calificación
Inicial	Final	m/Km	Paterson	
0+000	11+000	4,15	2,37	Regular

Fuente: Elaboración propia.

Observando la tabla 4.9., según el PSI, se determina que el tramo en estudio tiene como resultado final de calificación como “*REGULAR*”, respecto a su serviciabilidad.

4.1.4. Análisis de resultados de la macrotextura

Los resultados obtenidos de la macrotextura fueron determinados con el equipo mancha de arena, por lo tanto, los resultados finales proporcionan un parámetro de la textura como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 4.10. Calificación de la macrotextura de los carriles ida y vuelta

Prog. inicial	Prog. final	MTD (mm) ida	Textura	MTD (mm) vuelta	Textura
0+000	1+000	0,49	Media	0,43	Media
1+000	2+000	0,33	Fina	0,45	Media
2+000	3+000	0,46	Media	0,56	Media
3+000	4+000	0,33	Fina	0,32	Fina
4+000	5+000	0,34	Fina	0,38	Fina
5+000	6+000	0,30	Fina	0,48	Media
6+000	7+000	0,30	Fina	0,31	Fina
7+000	8+000	0,51	Media	0,39	Fina
8+000	9+000	0,47	Media	0,39	Fina
9+000	10+000	0,46	Media	0,32	Fina
10+000	11+000	0,50	Media	0,45	Media
Promedio		0,41	Media	0,41	Media

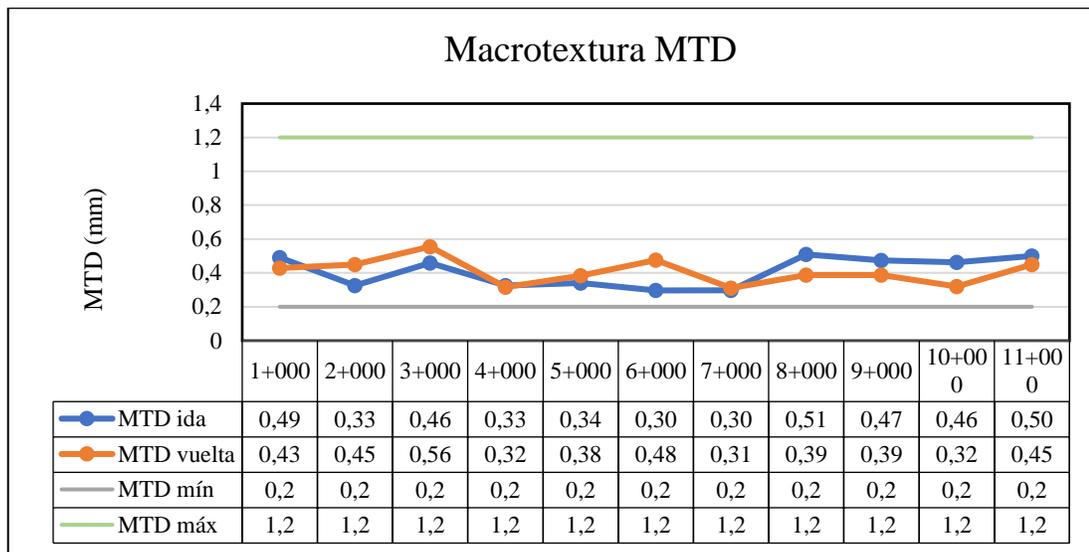
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al manual de carreteras de Bolivia nos indica que los requisitos mínimos para mantener una resistencia al resbalamiento satisfactoria a velocidades de 90 km/h será de 1 mm para superficies bituminosas, lo cual en los tramos evaluados ninguno cumple con este parámetro.

Tomando en cuenta el manual de carreteras de Chile solamente dos de los siete tramos cumplen ya que los demás se encuentran por debajo del mínimo que es 0.60 mm. Cabe mencionar que este parámetro no está afectado a multas, aceptándose solo efectuar acciones correctivas en los tramos con deficiencia, para dar cumplimiento a lo especificado en cada sector.

De acuerdo a la normativa podemos clasificar la textura de cada tramo de 1 km., de 22 tramos evaluados 11 subtramos se clasifican con una textura “*media*”, y 11 tramos se clasifican con textura “*fina*”.

Gráfico 4.1. Comportamiento de la macrotextura para ida y vuelta



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el gráfico 3.3., todos los resultados de la microtextura están dentro del rango de máximos y mínimos, sin embargo, hay valores de MTD que son similares en ciertas progresivas, como, por ejemplo, en la progresiva 4+000 con 0,33 mm y 0,32 mm y en la progresiva 7+000 con 0,30 mm y 0,31 mm. Pero observando los valores casi todos están muy bajos, dando como resultado texturas entre finas y medias

Luego a partir de los resultados promedio MTD por kilómetro, de los sentidos ida y vuelta, se determina el MTD de todo el tramo en estudio, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 4.11. Calificación de la macrotextura del proyecto

Progresiva		MTD	Textura
Inicial	Final	mm	
0+000	11+000	0,41	Media

Fuente: Elaboración propia.

Observando la tabla 4.11. según el MTD, se determina que el tramo en estudio tiene como resultado final una textura “**MEDIA**”, lo cual es aceptable, porque muestra seguridad

durante el contacto superficial de la carpeta y el neumático, es decir permite que los vehículos tomen velocidad con facilidad.

4.1.5. Análisis de resultados de la microtextura

La microtextura se determina con el equipo Péndulo Británico, el cual determina la microtextura a través de la resistencia al patinaje que se presenta en la capa de rodadura del pavimento. Los resultados finales de los sentidos ida y vuelta, son calificados en la siguiente tabla:

Tabla 4.12. Calificación de la microtextura de los carriles ida y vuelta

Prog. inicial	Prog. final	RD (mm) ida	Calificación	RD (mm) vuelta	Calificación
0+000	1+000	0,88	Bueno a regular	0,97	Malo
1+000	2+000	0,85	Bueno a regular	0,88	Bueno a regular
2+000	3+000	0,87	Bueno a regular	0,93	Malo
3+000	4+000	0,66	Bueno	0,78	Bueno
4+000	5+000	0,84	Bueno a regular	0,90	Bueno a regular
5+000	6+000	0,86	Bueno a regular	0,81	Bueno a regular
6+000	7+000	0,86	Bueno a regular	0,87	Bueno a regular
7+000	8+000	0,87	Bueno a regular	0,82	Bueno a regular
8+000	9+000	0,87	Bueno a regular	0,81	Bueno
9+000	10+000	0,84	Bueno a regular	0,81	Bueno
10+000	11+000	0,85	Bueno a regular	0,83	Bueno a regular
Promedio		0,84	Bueno a regular	0,86	Bueno a regular

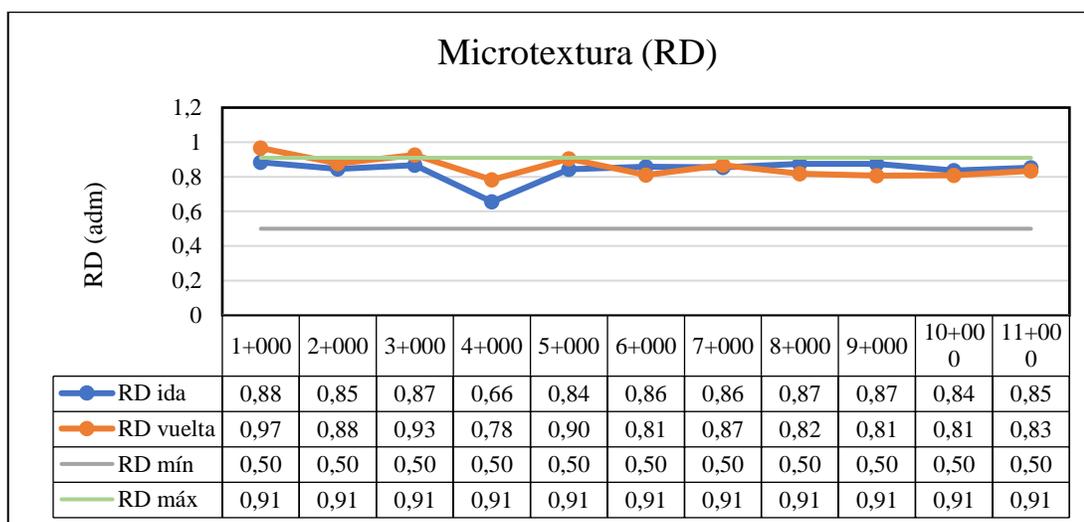
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al manual de carreteras de Bolivia nos indica que los requisitos mínimos para microtextura aceptable es de 0,50, sin embargo, la máxima aceptable es de 0,91.

Con esta normativa podemos calificar la microtextura para cada tramo de 1 km., de 22 tramos evaluados 16 tramos se califican como “*bueno a regular*”, mientras que 4 tramos se califican como “*bueno*” y 2 tramos se califican como “*malo*”.

A su vez para visualizar mejor el comportamiento de los resultados se procede a graficar de la siguiente manera:

Gráfico 4.2. Comportamiento de la microtextura para ida y vuelta



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el gráfico 4.2., todos los resultados de la macrotextura superan al mínimo de 0,50, sin embargo, hay valores de RD que superan el máximo de 0,91 en la progresiva 1+000 con 0,97 y en la progresiva 3+000 con 0,93.

Pero observando el gráfico en conjunto, se observa una tendencia muy próxima al máximo, lo que indica que están en un rango por lo general de “bueno a regular”.

Luego a partir de los resultados promedio RD por kilómetro, de los sentidos ida y vuelta, se determina el RD de todo el tramo en estudio, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 4.13. Calificación de la microtextura del proyecto

Progresiva		RD	Calificación
Inicial	Final	Adm	
0+000	11+000	0,85	Bueno a regular

Fuente: Elaboración propia.

Observando la tabla 4.13. según el RD, se determina que el tramo en estudio tiene como resultado final una calificación “**BUENO A REGULAR**”, lo cual es aceptable, porque muestra seguridad al deslizamiento, encontrándose en un punto medio entre patinaje y desgaste de neumáticos.

4.1.6. Análisis de resultados del método IFI

Los resultados IFI por kilómetro, en los carriles de ida y vuelta, son:

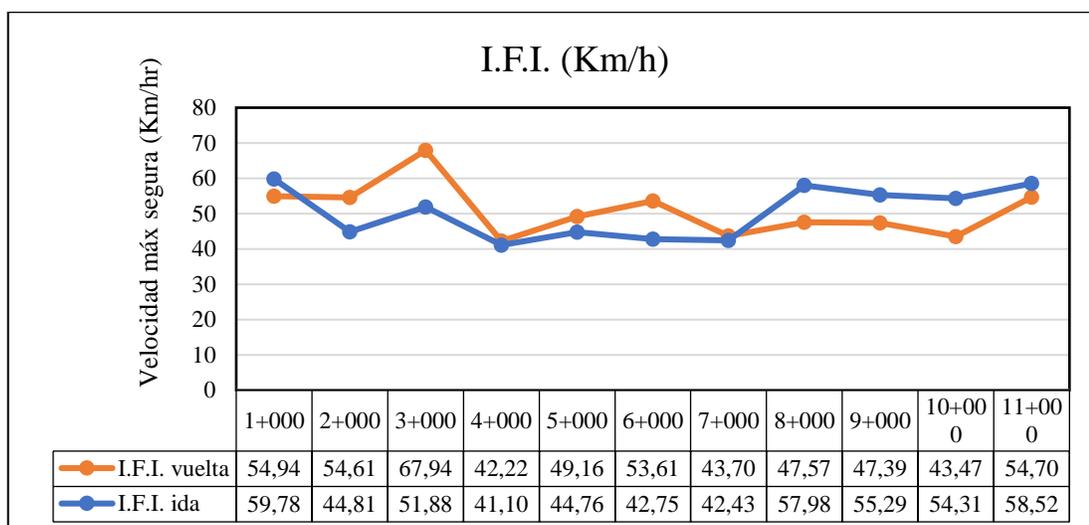
Tabla 4.14. Resultados del Índice de Fricción internacional (I.F.I.)

Progresiva inicial	Progresiva final	I.F.I. (Km/h)	
		Ida	Vuelta
00+000	01+000	59,78	54,94
01+000	02+000	44,81	54,61
02+000	03+000	51,88	67,94
03+000	04+000	41,10	42,22
04+000	05+000	44,76	49,16
05+000	06+000	42,75	53,61
06+000	07+000	42,43	43,70
07+000	08+000	57,98	47,57
08+000	09+000	55,29	47,39
09+000	10+000	54,31	43,47
10+000	11+000	58,52	54,70
Promedio		50,33	50,85

Fuente: Elaboración propia

Luego graficando los datos para observar el comportamiento de los resultados, se obtiene el siguiente gráfico:

Gráfico 4.3. Comportamiento de los resultados I.F.I. ida y vuelta



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el gráfico 3.7., el comportamiento de las velocidades máximas seguras varía, de un sentido a otro, sin embargo, se pueden observar en dos progresivas que los valores de velocidades de asemejan entre sí, es decir, para la progresiva 4+000 con valores IFI de 42,22 de vuelta y 41,10 de ida, y para la progresiva 7+000 con valores IFI de 43,70 de vuelta y 42,43 de ida.

Luego a partir de los resultados promedio IFI por kilómetro, de los sentidos ida y vuelta, se determina el IFI de todo el tramo en estudio, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 4.15. Resultado final IFI del proyecto

Progresiva		IFI
Inicial	Final	Km/h
0+000	11+000	50,59

Fuente: Elaboración propia.

Observando la tabla 4.15. según el IFI, se determina que el tramo en estudio tiene como resultado final, una velocidad máxima segura de 50,59 km/h, lo cual es aceptable, porque está por encima de los 40 km/h para tránsito de una carretera provincial, sin poner en riesgo al conductor ni al vehículo.

4.2. Resultados finales de la evaluación estructural

Para conocer a fondo si la falla es estructural y/o superficial, se procede a realizar, se procede a realizar la evaluación estructural por dos métodos: el método no destructivo, que se lo realiza con la viga Benkelman y el método destructivo, que se lo realiza exclusivamente a la carpeta asfáltica, extrayendo núcleos como muestras para someterlas al laboratorio y determinar parámetros de control de calidad.

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

Los resultados finales de deflexiones y radios de curvatura determinados con la viga Benkelman, para cada progresiva de los sentidos ida y vuelta, proporcionan los siguientes resultados:

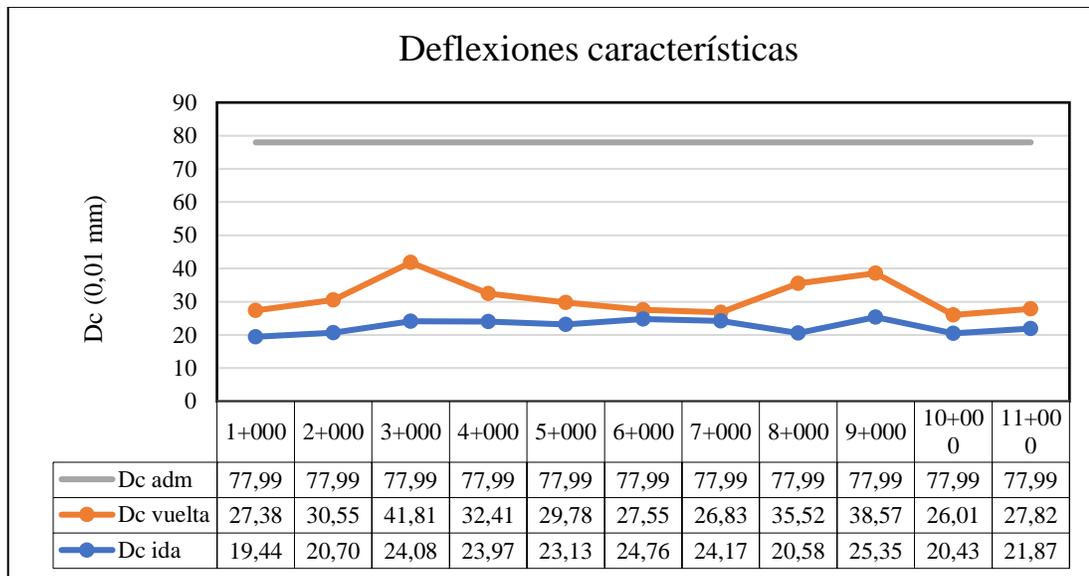
Tabla 4.16. Resultados de deflexiones y radios de curvatura del tramo ida y vuelta

Progresiva inicial	Progresiva final	Dc (0,01 mm)		RC (m)	
		Ida	Vuelta	Ida	Vuelta
00+000	01+000	19,44	27,38	856,43	738,90
01+000	02+000	20,70	30,55	777,53	786,68
02+000	03+000	24,08	41,81	790,50	527,55
03+000	04+000	23,97	32,41	802,81	528,96
04+000	05+000	23,13	29,78	787,81	808,90
05+000	06+000	24,76	27,55	934,18	826,04
06+000	07+000	24,17	26,83	831,99	822,92
07+000	08+000	20,58	35,52	907,95	443,25
08+000	09+000	25,35	38,57	607,04	553,77
09+000	10+000	20,43	26,01	602,96	844,34
10+000	11+000	21,87	27,82	838,59	832,34

Fuente: Elaboración propia

Para visualizar mejor los resultados de la tabla anterior, se procede a realizar los siguientes gráficos:

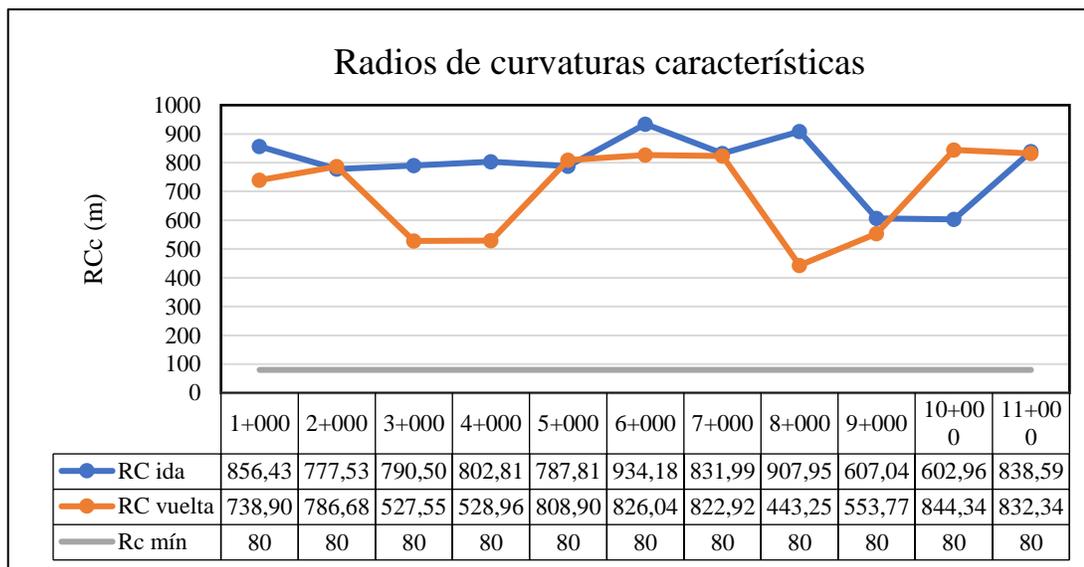
Gráfico 4.4. Resultados de deflexiones características del tramo ida y vuelta



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 4.4. se observa que 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 4.5. Resultados de radios de curvatura características del tramo ida y vuelta



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 4.5., se observa que los radios de curvatura características de ambos carriles se asemejan, sin embargo hay una tendencia que los radios de curvatura del carril de vuelta, son menores al carril de ida, sin embargo todos los resultados del tramo superan al valor mínimo de la norma de 80 m (valor que expresa rigidez del paquete estructural, casi nula recuperación).

4.2.2. Análisis de resultados por el método destructivo con la extracción de núcleos

Destructivamente se extrajeron núcleos de las carpetas asfálticas de diferentes progresivas intercaladas cada 2 km, y los mismos que fueron sometidos a dos tipos de pruebas: la primera a determinar las propiedades Marshall a través de ensayos volumétricos y rotura de los núcleos en prensa, y la segunda a través de extracción centrífuga para determinar el contenido de ligante y verificar la curva granulométrica según la norma ASTM.

4.2.2.1. Análisis de resultados de las propiedades Marshall

Los resultados finales obtenidos de las propiedades Marshall, de diferentes progresivas para los sentidos ida y vuelta, se resumen en la siguiente tabla:

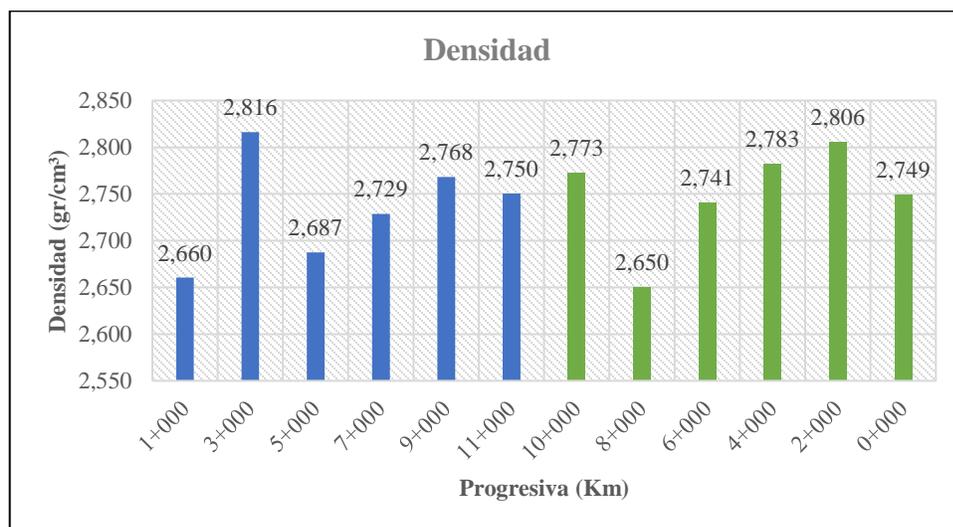
Tabla 4.17. Resultados de las propiedades Marshall

Nº	Progresiva	Sentido	Densidad (gr/cm ³)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01")
2	1+000	Ida	2,660	2587,54	17
4	3+000	Ida	2,816	2904,57	18
6	5+000	Ida	2,687	1689,61	19
8	7+000	Ida	2,729	1895,91	17
10	9+000	Ida	2,768	2298,44	20
12	11+000	Ida	2,750	2874,68	17
14	10+000	Vuelta	2,773	2613,57	18
16	8+000	Vuelta	2,650	1766,54	17
18	6+000	Vuelta	2,741	1906,18	18
20	4+000	Vuelta	2,783	2687,06	19
22	2+000	Vuelta	2,806	1934,47	18
24	0+000	Vuelta	2,749	2358,49	18

Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta tabla, se puede observar la variación de los resultados con los siguientes gráficos:

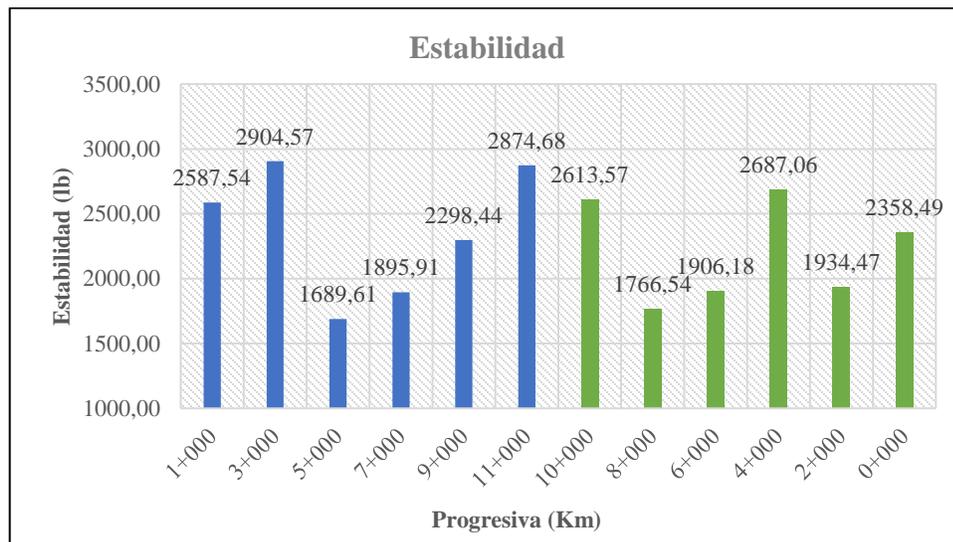
Gráfico 4.6. Resultados de la densidad Marshall



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el gráfico 4.6., las densidades superan la norma del mínimo de 2,30 gr/cm³, sin embargo, existe una variación de los resultados visible, donde el máximo se obtuvo del núcleo extraído de la progresiva 3+000, en el sentido ida, con un valor de 2,816 gr/cm³, y mínimo se obtuvo del núcleo extraído de la progresiva 8+000, en el sentido vuelta, con un valor de 2,650 gr/cm³.

Gráfico 4.7. Resultados de la estabilidad Marshall

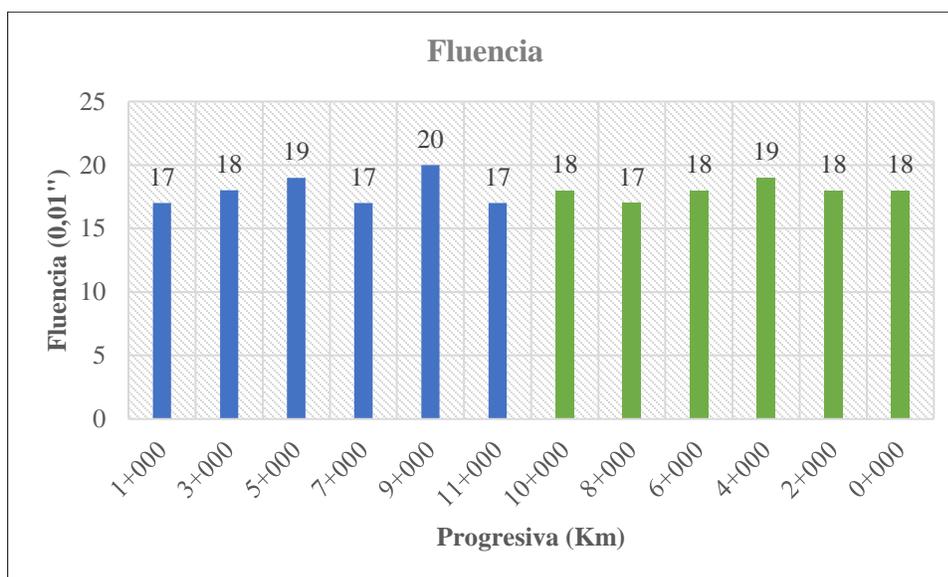


Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 3.13. se observan las variaciones de los resultados de las estabilidades Marshall, con mejores resultados en el sentido de ida (barras azules), por lo tanto, se refleja que en la progresiva 3+000 de ida, tiene el mejor resultado de estabilidad de 2904,57 lb, y también en el sentido de ida en la progresiva 5+000 se obtuvo el valor mínimo de estabilidad con un valor de 1689,61 lb.

Sin embargo, comparando con el valor mínimo de estabilidad según norma de 1800 lb, en dos progresivas no se cumple con los resultados, como ser en la progresiva 5+000 de ida y en la progresiva 8+000 de vuelta.

Gráfico 4.8. Resultados de la fluencia Marshall



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 4.8. se observan que las fluencias no cumplen la norma de 8 a 16 de 0,01 pulgadas de deformación, y superan el valor máximo, este resultado depende de dos factores: del exceso de cemento asfáltico o del exceso de agregado fino en la mezcla asfáltica. Cuyos valores serán analizados en la granulometría después de la extracción centrífuga del ligante.

A partir de los resultados obtenidos se procede a realizar la siguiente validación de los resultados, comparándolos con las normas y verificar si cumplen o no cumplen con las especificaciones.

Tabla 4.18. Validación de resultados de las propiedades Marshall

N°	Progresiva	Sentido	Densidad		Estabilidad		Fluencia	
			(gr/cm ³)	> 2,30	(lb)	> 1800	(0,01")	8 a 16
2	1+000	Ida	2,660	Cumple	2587,54	Cumple	17	No cumple
4	3+000	Ida	2,816	Cumple	2904,57	Cumple	18	No cumple
6	5+000	Ida	2,687	Cumple	1689,61	No cumple	19	No cumple
8	7+000	Ida	2,729	Cumple	1895,91	Cumple	17	No cumple
10	9+000	Ida	2,768	Cumple	2298,44	Cumple	20	No cumple
12	11+000	Ida	2,750	Cumple	2874,68	Cumple	17	No cumple
14	10+000	Vuelta	2,773	Cumple	2613,57	Cumple	18	No cumple
16	8+000	Vuelta	2,650	Cumple	1766,54	No cumple	17	No cumple
18	6+000	Vuelta	2,741	Cumple	1906,18	Cumple	18	No cumple
20	4+000	Vuelta	2,783	Cumple	2687,06	Cumple	19	No cumple
22	2+000	Vuelta	2,806	Cumple	1934,47	Cumple	18	No cumple
24	0+000	Vuelta	2,749	Cumple	2358,49	Cumple	18	No cumple

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 4.18., todas las densidades cumplen con las especificaciones, luego respecto a la estabilidad sólo dos no cumplen con el mínimo de la norma y los resultados de la fluencia, ninguno cumple los rangos máximo y mínimo de la norma.

4.2.2.2. Análisis de resultados de las extracciones centrífugas

Los núcleos que fueron sometidos al extractor centrífugo, proporcionan dos resultados importantes en cada progresiva, el primero es el contenido de ligante asfáltico de la carpeta asfáltica y el segundo es la distribución granulométrica que debe cumplir ciertos rangos de la norma ASTM. Los resultados finales obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

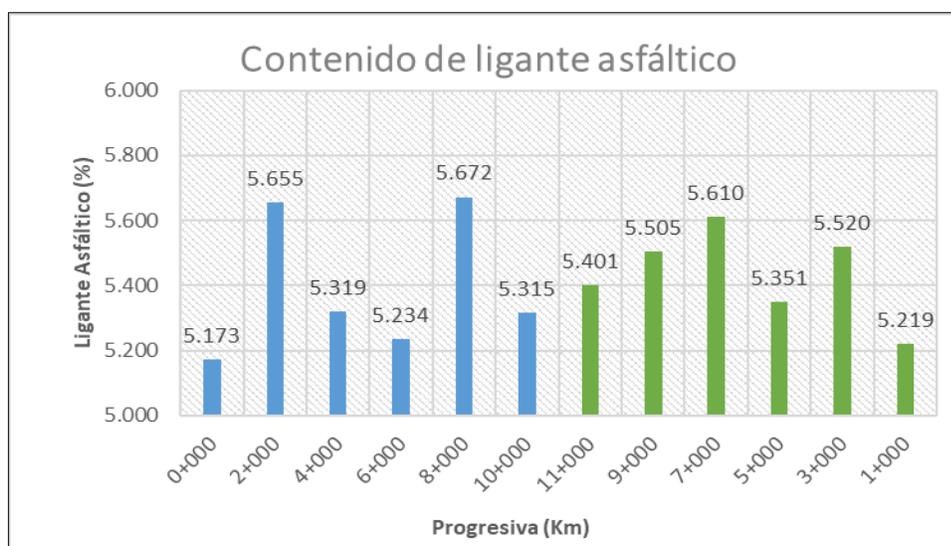
Tabla 4.19. Resultados finales de la extracción centrífuga

N°	Progresiva	Sentido	Contenido de ligante (%)	Granulometría - Porcentaje que pasa:						
				1" 100-100 (%)	3/4" 90 - 100 (%)	3/8" 56 - 80 (%)	N° 4 35 - 65 (%)	N° 8 23 - 49 (%)	N° 50 5 - 19 (%)	N° 200 2 - 8 (%)
1	0+000	Ida	5,173	100,00	94,66	64,25	49,22	37,77	12,67	2,08
3	2+000	Ida	5,655	100,00	91,07	69,51	53,83	40,81	16,47	4,92
5	4+000	Ida	5,319	100,00	87,64	66,48	51,27	39,29	15,88	3,45
7	6+000	Ida	5,234	100,00	86,35	68,40	52,00	41,93	10,47	2,91
9	8+000	Ida	5,672	100,00	88,22	59,81	42,56	36,74	18,92	3,84
11	10+000	Ida	5,315	100,00	95,22	72,90	61,28	46,44	10,03	3,69
13	11+000	Vuelta	5,401	100,00	91,50	63,28	49,85	35,43	11,19	3,11
15	9+000	Vuelta	5,505	100,00	88,64	61,27	52,15	38,51	11,02	2,84
17	7+000	Vuelta	5,610	100,00	90,94	67,68	52,87	43,20	13,17	2,00
19	5+000	Vuelta	5,351	100,00	95,35	80,49	62,63	44,43	9,7	1,28
21	3+000	Vuelta	5,520	100,00	85,99	56,22	46,57	38,50	17,38	6,23
23	1+000	Vuelta	5,219	100,00	87,38	66,85	55,91	38,80	7,00	1,77

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados de la tabla 4.19., la variación de los contenidos de ligante asfáltico de los núcleos extraídos de los sentidos ida (azul) y vuelta (verde), se visualizan en el siguiente gráfico:

Gráfico 4.9. Variación del contenido del ligante del tramo ida y vuelta

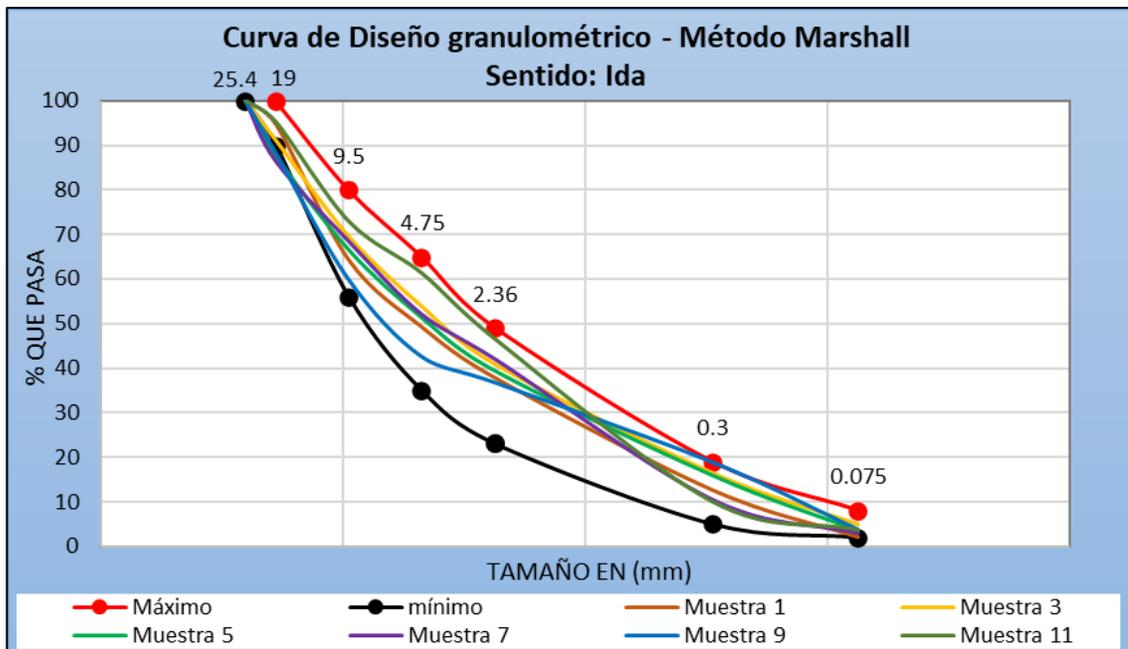


Fuente: Elaboración propia.

Los contenidos de ligante varían de kilómetro a kilómetro, no tienen un valor constante, como se observa en el gráfico, los contenidos de cemento asfáltico más altos se dan en el carril de ida, en la progresiva 8+000 con 5,72 % y en la progresiva 2+000 con 5,655 %, y el valor más bajo, también se da en el carril de ida, en la progresiva inicial 0+000 con 5,173 %, por lo tanto, en el carril de vuelta, resultan valores un poco más constantes.

Después se grafican los resultados granulométricos para los carriles de ida y de vuelta, como se observan en los siguientes gráficos:

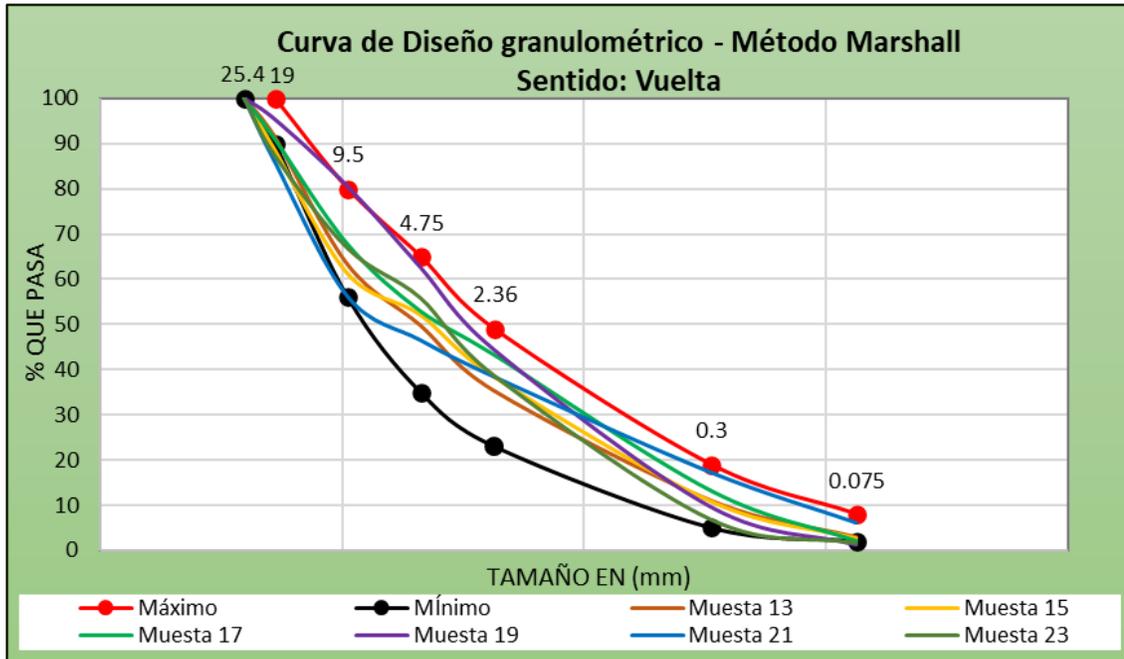
Gráfico 4.10. Curvas granulométricas de núcleos extraídos del carril de ida



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.10., se observan que la mayoría de las curvas granulométricas están dentro de las franjas máxima y mínima de la norma, a excepción de las muestras 5, 7 y 9, que en la parte del agregado grueso están por debajo de la franja mínima de la norma, por lo tanto, expresa déficit de agregado grueso (grava).

Gráfico 4.11. Curvas granulométricas de núcleos extraídos del carril de vuelta



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.11., se observan que la mayoría de las curvas granulométricas están dentro de las franjas máxima y mínima de la norma, a excepción de las muestras 15, 21 y 23, que en la parte del agregado grueso están por debajo de la franja mínima de la norma, por lo tanto, expresa déficit de agregado grueso (grava), de la muestra 19, que está por encima de la franja máxima, en la parte del agregado semigrueso que expresa exceso de gravilla, y finalmente las muestras 19 y 23, que en la parte del agregado fino, están por debajo de la franja mínima, lo cual expresa déficit de filler.

Después según los resultados obtenidos, se realiza una validación según especificaciones Marshall, para verificar si cumple o no, con los rangos máximos y mínimos de las especificaciones de la norma, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.20. Valoración de resultados finales del centrífugo

Nº	Progresiva	Sentido	Contenido de ligante		Granulometría - Porcentaje que pasa:							Diseño granulométrico
					1"	3/4"	3/8"	Nº 4	Nº 8	Nº 50	Nº 200	
			(%)	5% - 6%	100-100 (%)	90 - 100 (%)	56 - 80 (%)	35 - 65 (%)	23 - 49 (%)	5 - 19 (%)	2 - 8 (%)	
1	0+000	ida	5.173	Cumple	100,0	94,66	64,25	49,22	37,77	12,67	2,08	Cumple
3	2+000	ida	5.655	Cumple	100,0	91,07	69,51	53,83	40,81	16,47	4,92	Cumple
5	4+000	ida	5.319	Cumple	100,0	87,64	66,48	51,27	39,29	15,88	3,45	No cumple en grava
7	6+000	ida	5.234	Cumple	100,0	86,35	68,40	52,00	41,93	10,47	2,91	No cumple en grava
9	8+000	ida	5.672	Cumple	100,0	88,22	59,81	42,56	36,74	18,92	3,84	No cumple en grava
11	10+000	ida	5.315	Cumple	100,0	95,22	72,90	61,28	46,44	10,03	3,69	Cumple
13	11+000	vuelta	5.401	Cumple	100,0	91,50	63,28	49,85	35,43	11,19	3,11	Cumple
15	9+000	vuelta	5.505	Cumple	100,0	88,64	61,27	52,15	38,51	11,02	2,84	No cumple en grava
17	7+000	vuelta	5.610	Cumple	100,0	90,94	67,68	52,87	43,20	13,17	2,00	Cumple
19	5+000	vuelta	5.351	Cumple	100,0	95,35	80,49	62,63	44,43	9,67	1,28	No cumple en gravilla y filler
21	3+000	vuelta	5.520	Cumple	100,0	85,99	56,22	46,57	38,50	17,38	6,23	No cumple en grava
23	1+000	vuelta	5.219	Cumple	100,0	87,38	66,85	55,91	38,80	7,00	1,77	No cumple en grava y filler

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la anterior tabla, los contenidos de cemento asfáltico cumplen con los parámetros que deben estar entre 5 a 6 % de contenido de ligante, estos resultados garantizan que no exista falta o exceso de cemento asfáltico, ni que se eleve el presupuesto de la carpeta asfáltica.

Respecto a la granulometría, hay una variación en los resultados, puesto que no todos cumplen con los rangos establecidos en las especificaciones de la norma, esto se debe a que existe un déficit de agregado grueso, es decir en las curvas se observa mayor cantidad de arena, este factor también influye en los valores de la fluencia, ya que puede reducir la estabilidad y producir mayor deslizamiento interno entre agregados.

“NO ES CORRECTO HACER UNA GRANULOMETRIA A UNA BRIQUETA EXTRAIDA”

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

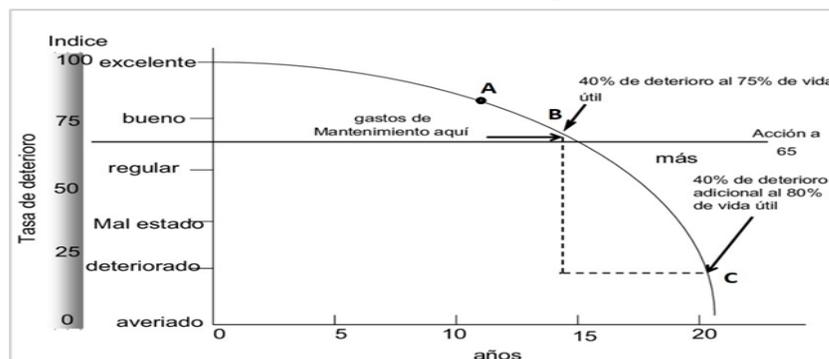
Las conclusiones para el presente trabajo final son:

- Se investigó y profundizó sobre el conocimiento de los pavimentos, su estructura, características, comportamiento y evaluación.
- Se efectuaron satisfactoriamente las mediciones de campo para obtener los indicadores de estado superficial y estructural en la vía en estudio.
- Se logra concretar con los objetivos propuestos, al realizar la evaluación superficial y estructural en ambos carriles del tramo vial de 11 km.
- Se realizó el trabajo de gabinete y se encontraron los resultados de cada uno de los indicadores de estado anteriormente mencionados.

Luego de un profundo análisis de los resultados, se calificó cada uno de los indicadores de estado como se muestra a continuación:

- Los resultados finales del índice de condición del pavimento para el tramo estudiado “San Lorencito – cruce Iscayachi” tienen un valor numérico de 25,75 valor que pertenece según la escala del método PCI a una calificación de “malo” según el manual de fallas nos dice que la condición del pavimento ha caído en estado crítico, En este punto se requieren trabajos de mantenimiento mayor, rehabilitación o reconstrucción.

Curva de deterioro del pavimento



Fuente: Ing. Augusto Jugo B.

Como se puede ver en el gráfico anterior, el valor del PCI nos indica que está en el punto que necesita un mantenimiento inmediato.

- Haciendo un análisis de costos, se puede verificar que el precio estimado de reparación y mantenimiento de la vía “San Lorencito – cruce Iscayachi” es de 4.626.766,53 Bs (cuatro millones seiscientos veintiséis mil setecientos sesenta y seis 53/100 bolivianos) o 691.594,40 USD (seiscientos noventa y un mil quinientos noventa y cuatro 40/100 dólares americanos).
- El resultado mediante el IRI es un valor de 4,15 m/km, el cual indica que tiene una calificación de “regular”.
- A partir de la determinación del índice de regularidad internacional I.R.I. con la rueda de Merlín, se logra, a través de la fórmula de Paterson, determinar el PSI igual a 2,37, dicho valor muestra que el tramo vial en estudio se encuentra en un estado “regular”.
- También respecto a la macrotextura, los resultados obtenidos se encuentran entre textura media a fina, esto indica que no existe desprendimiento de agregados de la carpeta asfáltica.
- Respecto a la microtextura, los resultados obtenidos se encuentran entre “bueno a regular”, por lo tanto, expresa que tiene cierta rugosidad en el acabado de la carpeta asfáltica, y tiene la tendencia al desgaste de las llantas.

- A partir de la determinación del índice de fricción internacional IFI, se observan los resultados del tramo vial en estudio tiene valores de velocidades máximas seguras desde 40 km/h, hasta 70 km/h, lo cual son valores aceptables para el tránsito seguro vehicular.
- Respecto a la evaluación estructural, por el método no destructivo, con el uso del equipo viga Benkelman, se concluye que las deflexiones máximas características no superan a la deflexión máxima admisible, por lo tanto, los datos son aceptables y las deformaciones no son de gran magnitud.
- Así también la evaluación estructural con el método destructivo, a través de la extracción de núcleos, se determina que los contenidos de ligante asfáltico se encuentran dentro de los parámetros recomendables por calidad y economía, entre

5 a 6 % de contenido de ligante asfáltico. Sin embargo, los resultados granulométricos no son tan buenos porque en varias progresivas no cumplen con las especificaciones máximas y mínimas de la norma, y por lo general se observa un déficit de agregados gruesos (grava y gravilla).

“NO ES CORRECTO HACER UNA GRANULOMETRÍA A UNA BRIQUETA EXTRAIDA

- Respecto a la evaluación estructural de resistencia de la carpeta asfáltica, casi todos los resultados de estabilidad superan el mínimo de la norma, sin embargo, los resultados de fluencia, ninguno cumple, es decir que tiene la tendencia de deformarse ante la presencia de calor (ensayo realizado a 60°C), lo cual es probable que no ocurra en el tramo de estudio, ya que se encuentra en una zona alta con bajas temperaturas.
- Finalmente se concluye que el tramo tiene más fallas superficiales que estructurales, por lo tanto, requiere reparación o mantenimiento en la carpeta de rodadura, ya sea con un recapamiento o con la remoción de la carpeta asfáltica deteriorada para la imprimación de una nueva carpeta asfáltica, con la finalidad de prolongar la vida útil del tramo, con mejor servicio para el tránsito vehicular.

5.2. Recomendaciones

Las recomendaciones para el presente trabajo final son:

- Es recomendable realizar el mantenimiento periódico y rehabilitación de la vía a la brevedad posible, ahora que se encuentra, según las conclusiones indica que es necesario una rehabilitación, ya que, si esta llega a postergarse más, las fallas encontradas en la vía pueden deteriorarse de manera más acelerada, lo cual se traduciría en gastos mucho mayores.
- Si bien partes de la vía se encuentra aceptable respecto a la transitabilidad, es necesario realizar un mantenimiento rutinario para la reparación de pequeños defectos en la calzada del pavimento, para evitar el aumento del deterioro de la vía estudiada.

- Es recomendable tomar en cuenta la cantidad de personas que prestaran los servicios de operador, técnicos y ayudantes sean los suficientes para abarcar todo el trabajo, ya que la ausencia de una persona puede traducirse en malas lecturas de los equipos y peligro a la integridad física de los que realizan el estudio.
- Realizar la evaluación estructural con la viga Benkelman en días con climas similares, para que no haya mucha variación en los resultados al momento de aplicar los coeficientes de corrección por temperatura.
- La evaluación superficial depende mucho de la capacidad del evaluador, ya que para realizar una evaluación efectiva se tiene que tener en cuenta el manual de fallas y tener mucho conocimiento para realizar la misma.
- Se recomienda realizar medidas correctivas a las fallas superficiales encontradas en la vía, ya que este puede llegar a tener mayores consecuencias a través de que se siga deteriorando por diferentes factores externos.
- En todo momento al realizar la evaluación tanto superficial como estructural, se debe tener presente el uso de equipo de seguridad, como ser; chalecos, conos, gafas, casco y botas de seguridad, esto para reducir el riesgo de sufrir accidentes durante el levantamiento de datos en campo.

