

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La infraestructura vial es uno de los pilares de desarrollo económico y social, las labores de mantenimiento y rehabilitación de los caminos son críticas para asegurar estándares satisfactorios de calidad en las vías, que aseguren la conectividad y la seguridad de los usuarios.

Una de las técnicas más utilizadas en la rehabilitación de pavimentos, tanto rígidos como flexibles, es el recapado con una nueva carpeta asfáltica. Uno de los principales desafíos de esta técnica de rehabilitación, es evitar o retardar la reflexión de las grietas desde el pavimento existente hacia la nueva carpeta asfáltica.

El presente trabajo de recapamiento del tramo Cruce Alto Senac – San Andrés estudiará las condiciones actuales del pavimento flexible, y con la información recogida se procederá al diseño de la carpeta asfáltica delgada 4 cm, con el fin de mejorar las condiciones actuales de la vía.

Una de las etapas iniciales y fundamentales para conocer las condiciones actuales del pavimento es la evaluación superficial y estructural del pavimento Cruce Alto Senac – San Andrés, para el presente trabajo se realizara una identificación y valoración de las fallas en el tramo de vía en estudio apoyándose en la metodología PCI (Índice de Condición del Pavimento) para una evaluación superficial, para la evaluación estructural se realizará en el ensayo de la Viga Benkelman, además se realizaran los siguientes ensayos: Péndulo Británico para determinar la Rugosidad del pavimento, Círculo de Arena para determinar la macro y microtextura del pavimento.

Con los resultados de estos ensayos se sabe que es procedente y justificable el diseño de la carpeta asfáltica delgada 4cm para el recapamiento del tramo.

El diseño esencialmente se basa en que la capacidad estructural de una sobre carpeta colocada encima del pavimento existente, debe satisfacer la deficiencia entre la

capacidad estructural requerida para soportar el tráfico futuro sobre un periodo de diseño especificado y la capacidad estructural efectiva del pavimento.

1.2. Justificación

Las características más notorias de las rutas que conforman la red de carreteras de Tarija es el aumento del flujo vehicular, Bolivia es un país en vía de desarrollo, por lo cual hoy en día se están realizando grandes inversiones económicas en el área de las obras viales.

Esto a su vez nos da a entender que una de las necesidades más importantes para el desarrollo de las diferentes regiones del país, es la construcción de más y mejores carreteras, al mismo tiempo tomar en cuenta las condiciones económicas que se disponen para este fin, es tal motivo que nace la necesidad de hacer un estudio de los pavimentos que se ejecutan en nuestro medio de tal forma de que se garantice la ejecución de los mismos con un alto nivel de serviciabilidad, con una capa de rodadura en óptimas condiciones durante el diseño, tomando en cuenta el costo que sea eficientemente adecuado a las características de la zona en la cual se ejecute el pavimento.

Si tomamos en cuenta los tipos de pavimentos que se construyen en el departamento de Tarija, la mayoría de los mismos son pavimentos flexibles de diferentes espesores, una pequeña parte pavimento rígido, tomando en cuenta estos factores, en el departamento de Tarija se están construyendo las vías secundarias con pavimentos con tratamientos superficiales triples y al mismo tiempo con carpetas delgadas de espesores similares, lo cual nos lleva a estudiar el recapamiento con carpeta delgada, tomando en cuenta un factor de vital importancia que es el costo del mismo, de tal forma que se tenga una capa de rodadura de buenas condiciones.

Realizando el estudio de la alternativa propuesta, necesariamente deberá ponerse en práctica el mismo, se eligió un tramo de ejecución por parte de la Dirección de Administración Vial (D.A.V-TARIJA) como es el “Tramo Vial Cruce Alto Senac – San Andrés”, dicho tramo cuenta con una longitud de 12200 metros (12.2 Km.), se garantiza los estudios de la alternativa propuesta.

El estudio de la carpeta delgada del tramo debe cumplir las expectativas de resistencia, seguridad y serviciabilidad durante su vida útil requerida, los ensayos necesarios para el diseño de la carpeta delgada se efectuarán en los laboratorios de la U.A.J.M.S.

El presente proyecto está dirigido a incentivar el mantenimiento de los pavimentos flexibles, planteando alternativa de solución en las fallas encontradas y de esta manera mejorar la transitabilidad, nivel de serviciabilidad, seguridad y comodidad a los usuarios de la región.

El recapado con carpeta asfáltica delgada sirve para alargar la vida útil del pavimento del tramo en estudio, el recapado es muy importante realizarlo antes que se deteriore las bases estructurales del pavimento, en este tramo carretero solo se realizó un tratamiento superficial en su etapa de ejecución, actualmente se encuentra desgastado por los años de servicio dados es por eso que se debe recapar la carretera, es una alternativa usada en otros países que tienen carreteras que cumplieron su ciclo y desean recuperar sus condiciones de serviciabilidad y comodidad de las vías en mal estado.

Al efectuarse este trabajo se pretende hacer conocer las características de la capa de rodadura, de tal manera de que sea un aporte a la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, especialmente a la Carrera de Ingeniería Civil, Dirección de Administración Vial (D.A.V-TARIJA), a las autoridades de las Comunidades que se benefician de este tramo carretero y para quienes les sea útil este tipo de información.

1.3. Planteamiento del problema

1.3.1. Situación problémica

La situación o estado actual de los pavimentos flexibles en la Región de Tarija, cuenta con uno de los principales problemas de todas las obras de infraestructura vial, que son las diferentes fallas o deterioros que se presentan después de su construcción, es decir; a lo largo de la vida útil del proyecto.

Para obtener adecuadamente una vía sin daños superficiales, se debe realizar las acciones de mantenimiento, el cual se realiza con la finalidad de efectivizar el periodo para el cual fue diseñado y de esta forma evitar complicaciones durante tiempo de

servicio de estos, un buen mantenimiento vial reduce de gran manera la aparición de inconvenientes durante la vida útil del pavimento.

La carretera desde su progresiva 0+000 rotonda Cruce Alto Senac hasta el 12+200 donde está ubicada la rotonda de San Andrés, cabe recalcar que en este tramo no se puso una carpeta de rodadura sino más bien es un tratamiento superficial, presenta los siguientes problemas:

La falta de mantenimiento del tramo y excavaciones que se realizan de gas y agua potable que se hacen a lo largo de la carretera y la falta de limpieza en las cunetas de evacuación de agua fluviales provoca que en la época de lluvia se desborde el agua hacia la superficie de la carretera provoca acumulación de áridos y agua sobre la superficie del asfalto provocando baches en la carretera, otros problemas que presenta son debido a los años de servicio y por el crecimiento del tráfico que demanda esta carretera, algunas fallas que presenta la carreta son desgaste de la capa de rodadura, agrietamiento, baches, fisuras longitudinales y parches que se hicieron en mantenimientos a la carretera.

1.4. Delimitación espacial y temporal del problema

1.4.1. Delimitación Espacial

El estudio se llevará a cabo en departamento de Tarija provincia Cercado específicamente en los 12.2 km que componen el tramo Cruce Alto Senac con la Comunidad de San Andrés.

- **Área de trabajo:** Pavimento flexible, cruce Alto Senac con la Comunidad de San Andrés.
- **Base de operaciones:** Trabajo de campo y laboratorio de asfaltos y hormigón.
- **Aplicación:** El recapamiento se realizará sobre el asfaltado del tramo Cruce Alto Senac – San Andrés.

1.4.2. Delimitación Temporal

El estudio se llevará a cabo en tiempo presente, es decir que se conoce el estado de la carretera actualmente y además de brindar una solución para el tramo en estudio.

1.4.3. Formulación del problema

¿Cuáles son las ventajas técnicas y económicas que brinda el uso de la carpeta asfáltica delgada para el recapado del tramo Cruce Alto Senac – San Andrés?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Estudiar la carpeta delgada para el recapamiento del tramo vial Cruce Alto Senac - San Andrés, adecuando una superficie de rodadura a los requerimientos actuales brindando una mejor seguridad vial a los usuarios.

1.5.2. Objetivos específicos

- Aplicar las metodologías de evaluación del estado superficial y estructural del pavimento flexible en el tramo a través de los siguientes métodos PCI, Péndulo Inglés, Círculo de arena y Viga Benkelman.
- Evaluar los resultados del estado superficial y estructural del tramo en estudio.
- Efectuar un estudio de los materiales pétreos y material asfáltico que serán empleados para las carpetas delgadas en el tramo de estudio.
- Impulsar el mantenimiento permanente de las carreteras para así evitar futuras fallas que puedan presentarse en su vida útil.
- Detallar el estudio técnico y económico de la carpeta delgada.

1.6. Alcance de la Investigación

Por el análisis propuesto el alcance de esta investigación es “no experimental” en la clasificación de investigaciones transeccionales del tipo descriptivo, ya que solamente describirá los aspectos técnicos y económicos que involucran el uso de las capas delgadas como mejoramiento de la carpeta superficial, además, que el levantamiento de la información relacionada es un solo tiempo.

1.7. Hipótesis

La carpeta delgada en pavimentos mejora los aspectos técnicos y económicos de un pavimento existente y deteriorado.

1.8. Operacionalización de las Variables

La variable independiente es el nivel de la condición física actual de la superficie.

La variable dependiente es condiciones técnicas y económicas.

1.8.1. Conceptualización y operacionalización de las variables:

Tabla 1. Conceptualización y operacionalización de las variables.

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor acción y técnica a usar
La variable es condiciones técnicas y económicas.	Con la evaluación del tramo se sabrá el estado estructural y superficial del pavimento en estudio y se procederá a los ensayos para el diseño de la carpeta asfáltica delgada del tramo.	Técnica	Costo/km	Evaluación Financiera
		Ensayos de Material	<ul style="list-style-type: none"> • Granulometría • Resistencia al Desgaste • Densidad Relativa y de Absorción • Caras Fracturadas • Resistencia a los sulfatos 	Por realizar en laboratorio
		Ensayos del Asfalto	<ul style="list-style-type: none"> • Peso Especifico • Penetración • Punto de ablandamiento • Viscosidad • Ductilidad • Punto de Inflamación • Adherencia árido-asfalto 	Por realizar en laboratorio
		Contenido mínimo de C.A.	Método Área Superficial	Kg C.A./100Kg
			Método de la Distribución de Agregados	Kg C.A./100Kg
		Contenido óptimo de C.A.	Método Marshall	Kg C.A./100Kg

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE

PAVIMENTOS FLEXIBLES

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.1. Introducción

En la actualidad no existe terminología uniforme común para la designación de las diferentes partes que constituyen un pavimento. Así, por ejemplo, algunos llaman pavimento a la capa superficial de mezcla bituminosa o de concreto; otros designan esta capa con el nombre de firme o afirmado, sin embargo, también puede ser un pavimento aquel que se constituye de varias capas teniendo cada una de ellas su función específica. Para el presente trabajo llamaremos pavimento a toda la estructura que descansa sobre el terreno natural.

2.2. Carpetas de concreto asfáltico

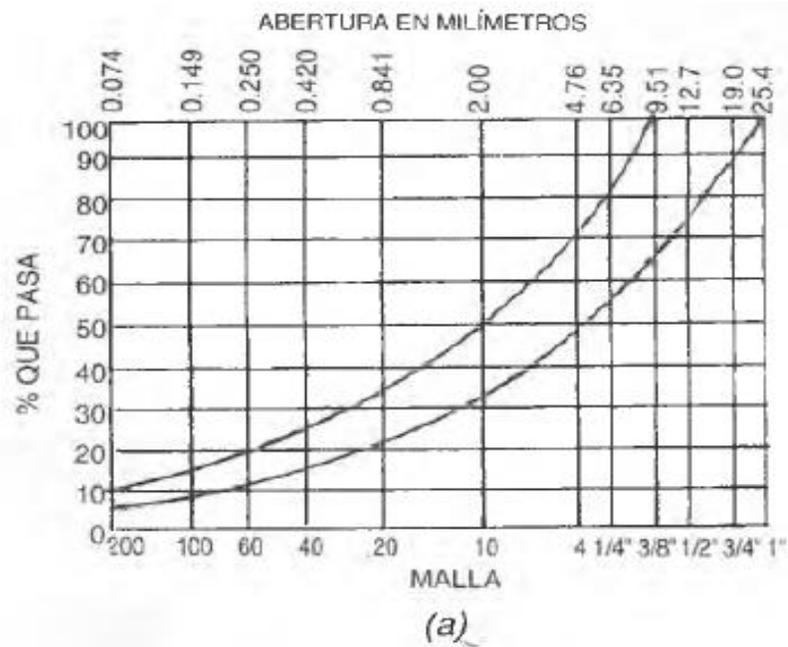
(Olivera Bustamante, 2009) define a las carpetas de concreto asfáltico como mezclas de materiales pétreos y cemento asfáltico. Como el cemento asfáltico es sólido a temperatura ambiente, es necesario calentarlo. Este aumento en la temperatura, se tiene que hacer en plantas, ya que la temperatura del cemento asfáltico necesita llegar a 140 °C y la temperatura de los materiales pétreos necesita llegar a 160°C.

Este tipo de carpetas, deben de ser construidas sobre bases hidráulicas o sobre bases asfálticas impregnadas. Si se llegan a construir sobre bases naturales con módulos de elasticidad bajos, sufrirá deformaciones ante las cargas del tránsito, la resistencia no será la deseada y su ruptura será frágil.

En las carpetas de concreto asfáltico, las normas granulométricas son muy exigentes, ya que sólo hay una zona como se muestra en la figura 1.

Para conocer el contenido óptimo del concreto asfáltico se utiliza la prueba Marshall.

Figura 1 Especificación granulométrica para materiales pétreos en asfaltos.



Fuente. Estructuración de vías terrestres, 1994.

Para poder construir las carpetas de concreto asfáltico, se deben de seguir los siguientes pasos:

- Elegir los bancos de material pétreo y llevarlos al laboratorio para poder elegir el banco adecuado.
- Hacer el proyecto granulométrico en el laboratorio para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico.
- Extraer el material.
- Proporcionar pétreos en frío a la planta de mezclado.
- Transportar el material al cilindro de calentamiento y secado donde alcanzará una temperatura entre 150 °C y 170 °C.
- Alcanzada la temperatura deseada, el material pétreo se sube a la unidad de mezclado, donde se mezcla con el cemento asfáltico que se encuentra entre los 130 °C y 140 °C.
- Llevar la mezcla al tramo con una temperatura mínima entre 110°C y 120°C. La mezcla debe descargarse en la finisher que se encarga de extenderlo y darle una ligera compactación.

- La compactación debe iniciarse a una temperatura mayor a los 90°C. con un rodillo de 7 ton. para dar un primer armado y evitar desplazamiento de la mezcla. Después con uno de 15 ton. El grado mínimo de compactación es de 95% del peso volumétrico del proyecto.

(Olivera Bustamante, 2009), dice que una carpeta asfáltica debe ser impermeable, de no ser así, se debe dar un riego de sello. El riego de sello sirve como superficie de desgaste para mejorar el coeficiente de rugosidad. Se utiliza material pétreo del número 3 y rebajados o emulsión de rompimiento medio.

Una carpeta que tiene menos asfalto del necesario, se desgranará, en el caso contrario, el asfalto brotará a la superficie haciéndola lisa y resbaladiza.

2.2.1. Funciones de un Pavimento

Un pavimento de una estructura, asentado sobre una fundación apropiada, tiene por finalidad proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confortable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática. Hay una gran diversidad de tipos de pavimento, dependiendo del tipo de vehículos que transitaran y del volumen de tráfico.

La Ingeniería de Pavimentos tiene por objetivo el proyecto, la construcción, el mantenimiento y la gerencia de pavimentos, de tal modo que las funciones sean desempeñadas con el menor costo para la sociedad. Tratándose, esencialmente, de una actividad multidisciplinaria, donde están involucrados conceptos y técnicas de las Ingenierías: Geotecnia, de Estructuras, de Materiales, de Transportes y de Sistemas, en vista de la importancia se debe estimar y efectuar el mantenimiento de pavimentos existentes.

En un camino no pavimentado, las condiciones de funcionamiento son precarias, lo que genera limitaciones en las velocidades y las cargas de los vehículos, también se elevan los costos operacionales (mantenimiento y combustible). La utilización de un camino de tierra depende de las condiciones climáticas y de un drenaje satisfactorio. En un camino con revestimiento primario (cascajo o un suelo pedregoso arenoso), las condiciones climáticas pueden ser menos importantes, pero si un drenaje eficaz.

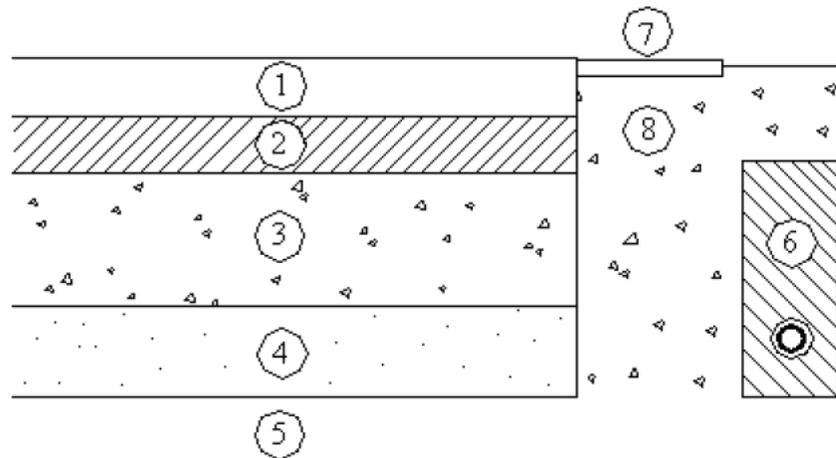
Un pavimento difícilmente sufre una ruptura catastrófica, a menos que exista un error en el proyecto geotécnico en casos como los de pavimentos asentados en terraplenes sobre suelos expansivos.

Esa degradación se da, usualmente, de forma continua a lo largo del tiempo es desde la abertura al tráfico, por medio de mecanismos complejos y que no están íntegramente relacionados, donde gradualmente se van acumulando deformaciones plásticas y siendo formadas a través de las capas (asfálticas o cementadas), provenientes de una combinación entre la acción de las cargas del tráfico y los efectos de la intemperie (variaciones de temperatura y humedad a lo largo del tiempo). Además, la condición de “ruptura” de un pavimento es, hasta cierto punto, indefinida y subjetiva, existiendo divergencias entre los técnicos y administradores en cuanto al mejor momento para restaurar un pavimento que presenta un cierto nivel de deterioro estructural y/o funcional.

2.3. Componentes de un pavimento

En la Figura 2 se muestra esquemáticamente, los componentes principales de un pavimento asfáltico. Se puede considerar que la estructura de un pavimento está formada por una superestructura encima de una fundación, esta última debe ser el resultado de un estudio geotécnico adecuado. En los pavimentos camineros, la superestructura está constituida por la capa de revestimiento y la capa base; la fundación está formada por las capas de subbase y suelo compactado.

Figura 2. Sección típica de un pavimento.



Fuente: Aeronautica,2000

- Capa de Rodadura
- Capa Base
- Capa Sub-base
- Suelo Compactado
- Subrasante
- Subdrenaje longitudinal
- Revestimiento de Hombreras
- Sub-base de Hombreras

La capa de rodadura o revestimiento asfáltico tiene las siguientes funciones:

- Impermeabilizar el pavimento, para que las capas subyacentes puedan mantener su capacidad de soporte.
- Proveer una superficie resistente al deslizamiento, incluso en una pista húmeda.
- Reducir las tensiones verticales que la carga por eje ejerce sobre la capa base, para poder controlar la acumulación de deformaciones plásticas en dicha capa.
- La capa base tiene las siguientes funciones:
- Reducir las tensiones verticales que las cargas por eje ejercen sobre las capas sub-base y suelo natural.

- Reducir las deformaciones de tracción que las cargas por eje ejercen a la capa de revestimiento asfáltico.
- Permitir el drenaje del agua que se infiltra en el pavimento, a través de drenajes laterales longitudinales.

La capa sub-base está constituida por un material de capacidad de soporte superior a la del suelo compactado y se utiliza para permitir la reducción del espesor de la capa base.

La capa de suelo reforzado, puede estar presente en una estructura de pavimento, para poder reducir el espesor de la capa sub-base.

El suelo compactado, es el mismo suelo del terraplén, que está escarificado y compactado una cierta profundidad dependiendo de su naturaleza o de las especificaciones del proyecto. (Crespo Villalaz, 2004)

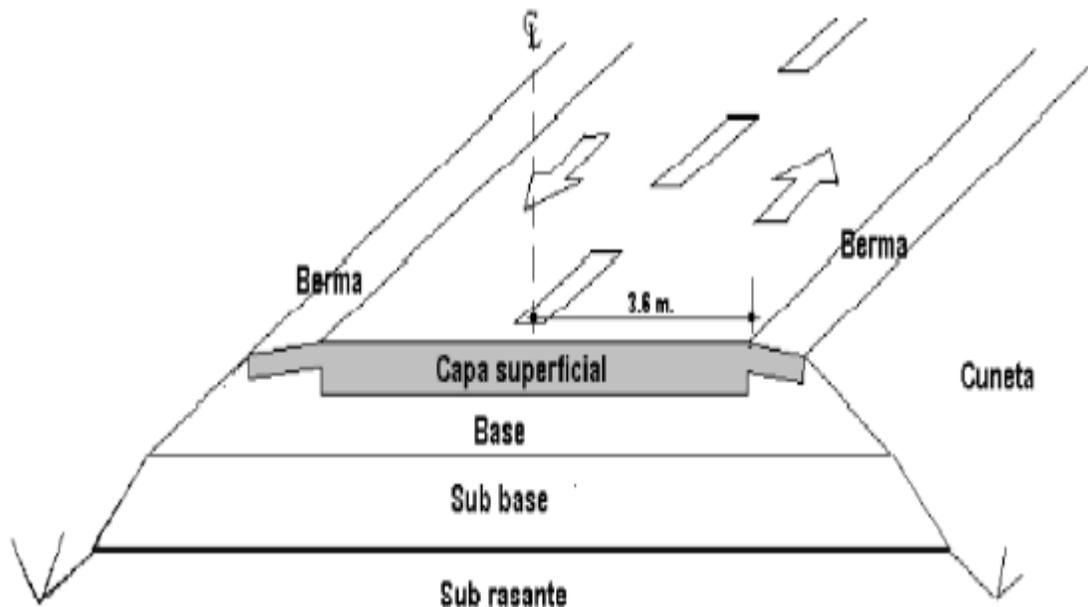
2.4. Clasificación de los Pavimentos

Por lo general se puede clasificar a los pavimentos en dos grandes grupos: Los pavimentos rígidos o de concreto hidráulico y los pavimentos flexibles o de asfalto. La diferencia estructural entre ellos estriba en que los pavimentos flexibles presentan muy poca resistencia a la flexión, y en los pavimentos rígidos la losa suele constituir la capa de rodamiento y el medio para soportar y distribuir las cargas transmitidas desde la superficie.

Al margen de estos dos grupos de pavimentos anteriormente mencionados, existen otros pavimentos de tipo especial, tales como aquellos formados por adoquines, ladrillos, bloques de madera, empleados algunas veces en calles, plazas, etc.

2.5. Pavimento Flexible

Figura 3. Estructura típica de un pavimento asfáltico (flexible).



Fuente: Artículo web: "Pavimentos"

2.5.1. Funciones de las capas de un pavimento flexible:

Rico Rodriguez & Del Catillo (2005) citan que sobre la capa subrasante se construye el pavimento flexible, que está compuesto por sub - base, base y carpeta asfáltica. El pavimento flexible debe proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como transmitir a las terracerías los esfuerzos por las cargas del tránsito. Entre las características principales que debe cumplir un pavimento flexible se encuentran las siguientes:

- Resistencia estructural.
- Deformabilidad.
- Durabilidad.
- Costo.
- Requerimientos de conservación.
- Comodidad.

2.5.1.1. Resistencia estructural

Debe soportar las cargas impuestas por el tránsito que producen esfuerzos normales y cortantes en la estructura. En los pavimentos flexibles se consideran los esfuerzos cortantes como la principal causa de falla desde el punto de vista estructural. Además de los esfuerzos cortantes también se tienen los producidos por la aceleración, frenado de los vehículos y esfuerzos de tensión en los niveles superiores de la estructura. (Rico Rodriguez & Del Catillo, 2005)

2.5.1.2. Durabilidad

La durabilidad está ligada a factores económicos y sociales. La durabilidad que se le desee dar al camino, depende de la importancia de este.

Hay veces que es más fácil hacer reconstrucciones para no tener que gastar tanto en el costo inicial de un pavimento.

2.5.1.3. Requerimientos de conservación

Los factores climáticos influyen de gran manera en la vida de un pavimento. Otro factor es la intensidad del tránsito, ya que se tiene que prever el crecimiento futuro. Se debe de tomar en cuenta el comportamiento futuro de las terracerías, deformaciones y derrumbes. La degradación estructural de los materiales por carga repetida es otro aspecto que no se puede dejar de lado.

La falta de conservación sistemática hace que la vida de un pavimento se acorte.

2.5.1.4. Comodidad

Para grandes autopistas y caminos, los métodos de diseño se ven afectados por la comodidad que el usuario requiere para transitar a la velocidad de proyecto. La seguridad es muy importante al igual que la estética.

2.6. Base y Sub – base

Según Olivera Bustamante (2009), Las sub-bases y las bases tienen finalidades y características semejantes; sin embargo, las primeras pueden ser de menor calidad. Las funciones de estas capas son:

- Reducir el costo de pavimento disminuyendo el espesor de la base.

- Recibir y resistir las cargas del tránsito a través de la capa que constituye la superficie de rodamiento (carpeta asfáltica o losa).
- Transmitir estas cargas, adecuadamente distribuidas, a las terracerías.
- Impedir que la humedad de las terracerías ascienda por capilaridad.
- En caso de introducirse agua por la parte superior, permitir que el líquido descienda hasta la capa subrasante, donde se desaloja al exterior por el efecto del bombeo o la sobreelevación.

Las características de calidad que se buscan en los materiales de sub – base, se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Materiales de Sub – Base.

Materiales de Sub - base	
Características	Zonas en que se clasifica el material de acuerdo con su granulometría
Limite liquido máximo	25%
Limite plástico máximo	6%
Compactación mínima	100%
Valor relativo de soporte estándar saturado, en porcentaje	50 mín
Equivalente de arena, en porcentaje	30 mín

Fuente: SCT (2006).

La base es la capa de material que se construye sobre la sub - base. Los materiales con los que se construye deben de ser de mejor calidad que los de la sub - base, según Olivera Bustamante (2009) la función de la base es:

- Tener la resistencia estructural para soportar las presiones transmitidas por los vehículos.

- Tener el espesor suficiente para que pueda resistir las presiones transmitidas a la sub - base.
- Aunque exista humedad la base no debe de presentar cambios volumétricos perjudiciales.

Las características de calidad que se buscan en los materiales para base, se muestran en la tabla 3.

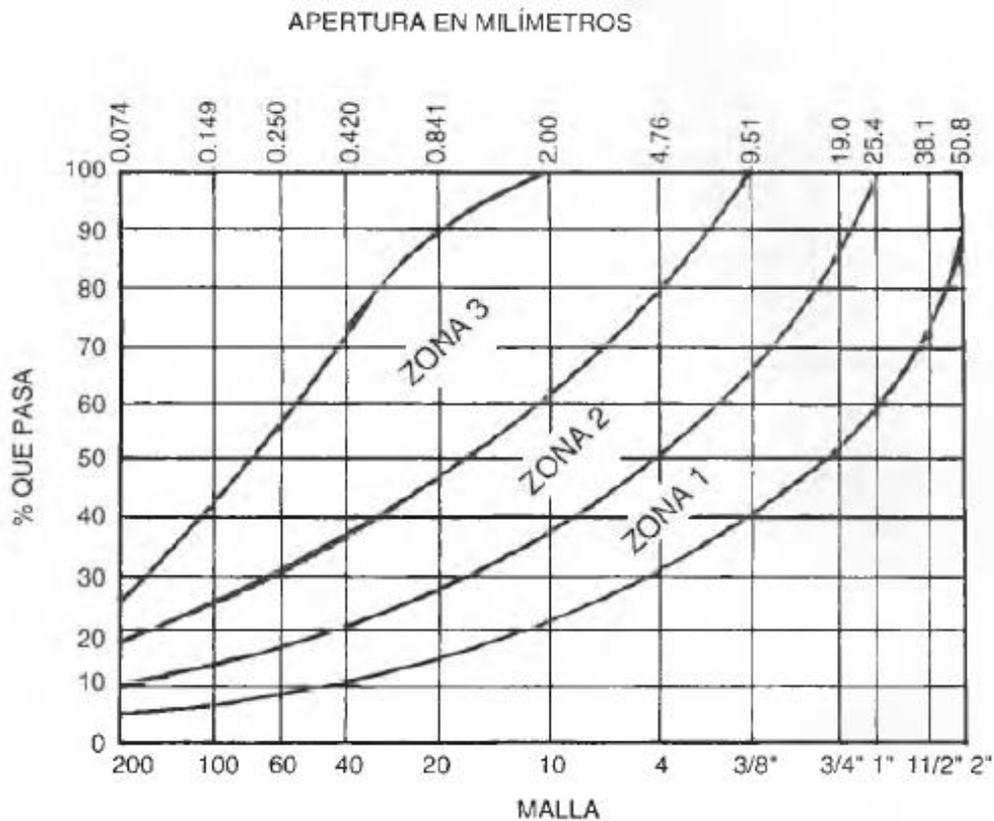
Tabla 3. Materiales de Base.

Materiales de Base	
Características	Zonas en que se clasifica el material de acuerdo con su granulometría
Limite líquido, en porcentaje (máx.)	25%
Índice plástico máximo	6%
Partículas alargadas y lajeadas máximo	35%
Compactación	100%
Valor relativo de soporte estándar saturado, en porcentaje	100 mín.
Equivalente de arena, en porcentaje	50 mín.
Índice de durabilidad, en porcentaje	40 mín.

Fuente: SCT (2006).

Las zonas en las cuales puede estar el material de acuerdo a su granulometría tanto para sub – base como para base se muestran en la figura 4.

Figura 4. Zona de especificaciones granulométricas (sub – base y base).



Fuente: Estructuración de vías terrestres (2009).

Para construir bases y sub - bases, es necesario (Olivera Bustamante, 2009):

- Realizar una exploración de la zona para elegir los bancos.
- Analizar la calidad de los materiales que se encontraron.
- Extraer y acarrear los materiales.
- Hacer tratamientos previos como el cribado, la trituración y en algunos casos estabilizar.
- Después de los tratamientos previos, es necesario que se acarreen a la obra y se les dé un tratamiento que incluye estabilizaciones mecánicas, disgregado y mezclado con motoniveladora para homogenizar el material.
- Compactar el material para que alcance 95% o 100% del P.V.S.M.
- Por último, se da un riego de impregnación. Este se aplica después de dejar secar la base durante varios días. Se aplica el riego distribuyendo el asfalto. El

riego sirve para tener una zona de transición entre la base y la carpeta asfáltica. El asfalto debe penetrar en la base mínima 3 mm.

2.6.1. Cemento asfáltico

El asfalto, llamado cemento asfáltico, es el último residuo de la destilación del petróleo. A temperaturas normales, es sólido y posee un color café oscuro.

Para poder mezclarlo con los materiales pétreos, éste debe tener una temperatura de 140 °C. (Olivera Bustamante, 2009)

2.7. Materiales de los Pavimentos Flexibles

Los materiales más usuales para conformar los pavimentos, son los agregados, y están constituidos de partículas minerales granulares, que incluyen los depósitos naturales de arena y grava. Los agregados que se utilicen en la construcción de pavimentos asfálticos deberán ser limpios, tenaces, durables y deberán tener una granulometría correcta. Las especificaciones más importantes que estas deben cumplir son:

- Granulometría.
- Resistencia al desgaste.
- Densidad relativa y de absorción.
- Porcentaje que pasa el tamiz N°200.
- Limpieza y pureza.
- Adherencia con el asfalto.

2.7.1. Granulometría

Es la determinación de la distribución y composición granulométrica de un material pétreo que se pretenda emplear en la elaboración de una carpeta asfáltica de diferentes características; es de vital importancia porque en función de ellas se puede determinar la clase de textura que tendrá la misma. La graduación de los agregados, que es la combinación de tamaños de partículas en la mezcla, afecta la densidad, la resistencia y la economía de la estructura del pavimento.

2.7.2. Resistencia al Desgaste

Resistencia al desgaste en la máquina de Los Ángeles (AASHTO T 96, INV. E-218-13, 219-13). Ensayo utilizado en teoría para medir la resistencia a la abrasión o desgaste por fricción entre partículas. Sin embargo, la realidad es que el ensayo solo representa una resistencia al fracturamiento entre partículas por impacto ya que, durante la prueba, agregados pétreos gruesos de hasta 37.5 mm (gravas) son impactados dentro de un cilindro metálico por esferas de acero de diámetro aproximado 46.8 mm y una masa comprendida entre 390g y 445 g, las cuales lo fracturan (ver figura 5).

Figura 5. Máquina de Los Ángeles.



Fuente. “UTEST”, Equipos para ensayos en materiales.

Para que los agregados cumplan satisfactoriamente su función, deben ser duros y resistir el desgaste debido al efecto de pulido del tránsito y a los efectos abrasivos internos de las cargas repetidas. La estimación más comúnmente aceptada de la dureza de los agregados es la prueba de abrasión de los Ángeles.

El desgaste es un efecto producido por la acción abrasiva del neumático sobre la superficie del pavimento y es un efecto importante dado que, al desgastarse, este baja su espesor y en consecuencia se pierde estructura. Esto puede ser prevenido mediante el empleo de agregados pétreos cuyo desgaste medido a través del ensayo de “Los Ángeles”, no sobrepase los límites de acuerdo a especificaciones técnicas.

2.7.3. Densidad Relativa y Absorción

La densidad relativa y absorción de los agregados son propiedades importantes que se requieren para el diseño del concreto y de las mezclas bituminosas. La densidad relativa de un sólido es la razón de su masa a la de un volumen igual de agua destilada a una temperatura específica. Debido a que los agregados pueden contener huecos permeables al agua, se usan dos medidas de la densidad relativa de los agregados: densidad relativa aparente y densidad relativa de la masa.

2.7.4. Porcentaje que Pasa el Tamiz N° 200

Interesa en la caracterización del agregado la determinación del porcentaje que pasa el tamiz N° 200, debido a que este tipo de material es muy influyente en la consistencia de la mezcla, para ello se hace un ensayo sencillo, determinando el porcentaje retenido en el tamiz # 200 de la muestra representativa del agregado, este valor no debe pasar del 5%.

2.7.5. Limpieza y Pureza

Generalmente se determina visualmente, pero es conveniente cuando hay dudas, efectuar un tamizado por vía húmeda.

Los materiales vegetales, partículas blandas, terrones de arcilla y partículas revestidas de arcillas no son aceptables, debido a que producen en las mezclas asfálticas mala adherencia, cambios granulométricos, etc.

2.7.6. Adherencia con el Asfalto

Esta prueba tiene por objeto el conocer si el material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de carpetas es de características hidrofílicas o hidrofóbicas. Se dice que un material es hidrofílico cuando tiene más afinidad por el agua que por el asfalto, e hidrofóbico en caso contrario. Si un material empleado para formar carpeta asfáltica es hidrofílico, dicho material atraerá al agua y desalojará a la película de asfalto que lo recubre y por lo tanto quedará destruida la adherencia entre el agregado y el asfalto y por ende se presentará la falla de la carpeta por la pérdida de estabilidad al separarse del asfalto.

La falta de adherencia del asfalto con el material pétreo puede presentarse por la presencia de una película fina de polvo adherido al material pétreo o debido a las características hidrofílicas del material que no es más que un fenómeno de tensión superficial entre las fases agregado-asfalto-agua.

Las características hidrofílicas de un material pétreo pueden ser modificadas empleando agentes químicos con lo cual se mejora mucho la adherencia del material con el asfalto. Para conocer si un material tiene una buena o mala adherencia con un determinado asfalto, debe efectuarse la prueba de desprendimiento por fricción.

2.8. Algunas ventajas del pavimento flexible

- **Mayor drenabilidad:** Las mezclas asfálticas de granulometría abierta proporcionan una drenabilidad mayor al permitir el desalojo del agua transversalmente sobre la macrotextura superficial que presentan, reduciendo el hidroplaneo y la proyección de agua.
- **Confort:** La sensación de confort que experimentan los pasajeros a bordo del vehículo es mayor sobre pavimentos asfálticos que sobre rígidos, debido a la naturaleza misma del pavimento asfáltico, su flexibilidad y a que las mezclas asfálticas se disponen en varias capas y no solo en una, como en el concreto.

(Del Val, 2010)

2.9. 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.

2.9.1. Importancia de la evaluación de pavimentos.

La evaluación de pavimentos es importante, pues 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 un deterioro de forma temprana se prolonga su vida de servicio ahorrando de esta manera gastos mayores.

2.9.2. Fallas en pavimentos flexibles.

Las fallas son el resultado de interacciones complejas de diseño, materiales, construcción, tránsito vehicular y medio ambiente. Estos factores combinados, son la causa del deterioro progresivo del pavimento, situación que se agrava, al no darle un mantenimiento adecuado a la vía. Existen dos tipos de fallas: estructurales y de superficie.

2.9.2.1. 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 mejoramiento sobre el pavimento existente para que el paquete estructural responda a las exigencias del tránsito presente y futuro estimado.

2.9.2.2. Fallas de superficie

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:

1. Fisuras y grietas;
2. Deformaciones superficiales;
3. Desintegración de pavimentos o desprendimientos;
4. Afloramientos y otras fallas.

Fallas comunes en los pavimentos según la clasificación de el “Cuerpo de ingenieros de la armada de Estados Unidos” en el método PCI (Pavement Condition Index)

En el manual del “Método de evaluación de pavimentos PCI” existen 19 tipos de falla comúnmente encontrados en pavimentos, que son los siguientes:

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. (pirhua.edep.edu.pe, 2009)

2.10. Evaluación superficial de un pavimento flexible

2.10.1. Evaluación de la condición de los pavimentos PCI

El método PCI (Pavement Condition Index) es un procedimiento que consiste en la determinación de la condición del pavimento a través de inspecciones visuales,

identificando la clase, severidad y cantidad de fallas encontradas, se mide la condición del pavimento de manera indirecta.

Fue desarrollado entre los años 1974 y 1976 a cargo del Centro de Ingeniería de la Fuerza Aérea de los E.E.U.U. con el objetivo de obtener un sistema de administración del mantenimiento de pavimentos rígidos y flexibles.

Este método constituye el modo más completo para la evaluación y calificación objetiva de pavimentos, siendo ampliamente aceptado y formalmente adoptado, 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).

Este método no pretende solucionar aspectos de seguridad si alguno estuviera asociado con su práctica. 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 los siguientes:

- 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

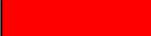
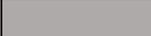
que permiten calcular directamente esta integridad). Cuando se habla de integridad estructural, se hace referencia a la capacidad que tiene el paquete estructural de soportar solicitaciones externas, como cargas de tránsito o condiciones ambientales. En cambio, el nivel de servicio es la capacidad del pavimento para brindar un uso confortable y seguro al conductor.

- Obtener un 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.

2.10.2. Rangos de calificación del PCI

El PCI es un índice que varía desde cero (0), para un pavimento en mal estado (Fallado), hasta cien (100) para un pavimento en perfecto estado (Excelente), la tabla 1 presenta los rangos de PCI con la correspondiente descripción cualitativa de la condición del pavimento, como se aprecia en la tabla 4.

Tabla 4. Índice de condición del pavimento (PCI) y escala de graduación

Rango	Clasificación	Simbología
100 - 85	Bueno	
85 - 70	Satisfactorio	
70 - 55	Regular	
55 - 40	Malo	
40 - 25	Muy Malo	
40 - 10	Grave	
10 - 0	Fallado	

Fuente: Procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en caminos y estacionamientos ASTM D6433-11.

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.

2.10.3. Procedimiento de evaluación de la condición del pavimento

La primera etapa corresponde al trabajo de campo en el cual se identifican cuidadosamente los daños teniendo en cuenta la clase, severidad y extensión de los mismos. Esta información se registra en formatos adecuados para tal fin. En la tabla 2, se ilustra el formato adoptado para el presente trabajo, y una segunda etapa que será el cálculo.

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.

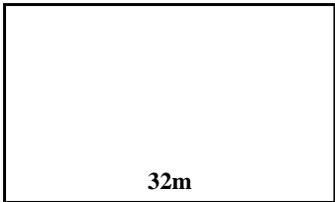
La severidad, representa la criticidad del deterioro en términos de su progresión; entre más severo sea el daño, más importantes deberán ser las medidas para su corrección. [8]. De esta manera, se deberá valorar la calidad del viaje, ósea, la percepción que tiene el usuario al transitar en un vehículo a velocidad normal; es así que se describe una guía general de ayuda para establecer el grado de severidad de la calidad de tránsito:

Bajo (B): 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.

Tabla 5. Hoja de registro en vías de pavimento flexible.

MÉTODO PCI (ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO)			
ZONA DE ESTUDIO "CRUCE ALTO SENAC - SAN ANDRÉS "			
Progre. Inicio:	0+096	ESQUEMA: 	
Progre. Final:	0+128		
Área(m²):	230,4		
Fecha:	21/10/2021		
Sección:	1		
Unidad de muestra:	4		
Inspeccionado por:	Rodrigo Eduardo Vega Yucra		
Fallas	Unidad de medida	Fallas	Unidad de medida
1.-Piel de cocodrilo	m²	14.-Ahuellamiento	m
2.-Exudación	m²	15.-Desplazamiento	m²
3.-Fisuras en bloque	m²	16.-Fisura parabólica o por deslizamiento	m²
4.-Elevación-Hundimiento	m²	17.-Hinchamiento	N#
5.-Corrugaciones	m²	18. Peladura por intemperismo y desprendimiento de agregados	m²
6.-Depresiones	m²	20.-Deformación por empuje	m²
7.-Fisuras de borde	m	21.-Deslizamiento	m²
8.-Fisuras de reflexión de juntas	m	22.-Hinchamiento	m²
9.-Desnivel Carril-Berma	m	23.-Disgregación-Desintegración	m²
10.-Fisuras longitudinales y transversales	m²	24.-Odulacion	m²
11.-Parches y parches de cortes utilitarios	m²	25.-Hundimiento	m²
12.-Agregado pulido	m²	26.-Surcos	m²
13.-Baches	m²		

Fuente: Elaboración Propia

2.10.4. División del pavimento en unidades de muestra

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 $230 \pm 93 \text{ m}^2$. En la tabla 6 se presentan algunas relaciones longitud _ ancho de calzada pavimentada (Manual de Daños de la Evaluación de la Condición de Pavimentos).

Tabla 6. Longitudes de Unidades de Muestreo Asfálticas.

Ancho de calzada (m)	Longitud de unidad de muestreo (m)
5.00	46.00
5.50	41.80
6.00	38.30
6.50	35.40
7.30 (máx.)	31.50

Fuente: (Pavement Condition Index (PCI) Para Pavimentos Asfálticos y de Concretos en Carreteras, 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 tener similares patrones para asegurar la exactitud para el cálculo (Manual de Daños de la Evaluación de la Condición de Pavimentos).

2.11. Resistencia al deslizamiento en el pavimento – Péndulo Británico.

La resistencia al deslizamiento está definida como: “la fuerza que se desarrolla a lo largo de la superficie de un pavimento, cuando una rueda está frenada o impedida de girar, usualmente, la resistencia al deslizamiento es entendida como la propiedad de una superficie que impide el deslizamiento de un cuerpo sobre ella” (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2017, pág. 975).

Por consiguiente, el termino descrito en líneas anteriores está relacionado directamente con el coeficiente de fricción que es: “una razón entre la resistencia al deslizamiento y la fuerza normal a la superficie donde el cuerpo se desliza”.

Las características al deslizamiento del pavimento, podría ser definida como: “la adherencia superficial” la cual está establecida por dos principales tipos de condiciones que a continuación son explicadas:

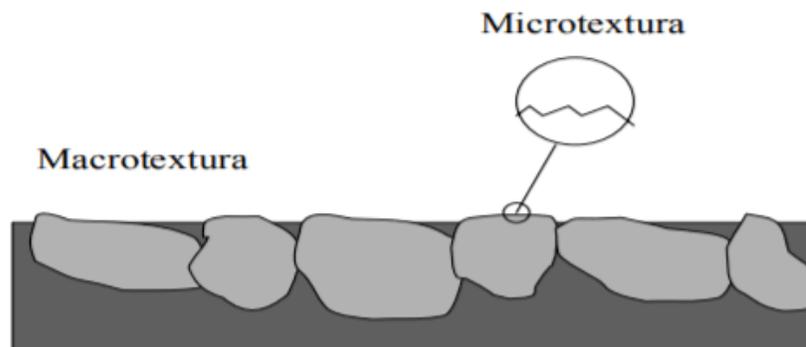
2.11.1. Microtextura

De acuerdo con (Roco H, Fuentes L, & Valverde P, 2016) define a la microtextura de la siguiente manera: “correspondiente a la textura superficial propia de la superficie de los agregados pétreos, las cuales pueden presentar características de tipo áspero o pulida”.

2.11.2. Macrotextura

Se refiere a: “la textura superficial del pavimento, proveniente del efecto conjunto de las partículas de los agregados pétreos que sobresalen de la superficie, dicho de otro modo, son las que conforman el tipo de mezcla que exista en la superficie, en el caso de tratamientos superficiales, la macrotextura será de agregado grueso, mientras en el caso de mezclas densas convencionales, la macrotextura será más fina” (Roco H, Fuentes L, & Valverde P, 2016)

Figura 6. Diferencia entre macrotextura y microtextura.



Fuente: (Roco H, Fuentes L, & Valverde P, 2016).

En otras palabras, el resultado de la combinación entre la microtextura y la macrotextura será lo que denominamos como resistencia al deslizamiento que presenta un pavimento.

2.11.3. Mediciones de resistencia al deslizamiento

Para calcular las cualidades antideslizantes de un pavimento, se obtiene el C.R.D. “coeficiente de resistencia al deslizamiento” mediante el ensayo del péndulo británico (TRRL) perteneciente al MTC E 1004.

El método para calcular el C.R.D. debe seguir una secuencia de medidas resistentes al deslizamiento con el péndulo británico, este péndulo es: “dinámico ya que se utiliza para cuantificar la energía perdida cuando el borde de un patín de goma se desliza sobre la superficie del pavimento”.

El ensayo MTC E 1004 “Determinación del coeficiente de resistencia al deslizamiento en el pavimento con péndulo Británico”, consta en: “la medición de la pérdida de energía de un péndulo de características conocidas provisto en su extremo de una zapata de goma, cuando la arista de la zapata roza, con una presión determinada sobre la superficie a ensayar, y en una longitud fija, esta pérdida de energía se mide por el ángulo suplementario de la oscilación de dicho péndulo” (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2017, pág. 975).

Figura 7. Péndulo Británico del TRRL.



Fuente: (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2017).

En la figura anterior, se observa todas las partes de un péndulo británico del TRRL.

Los resultados del ensayo del péndulo son usados en su mayoría de veces para las siguientes finalidades:

- Muestreo de la red vial para la gestión de pavimentos
- Especificaciones para la restauración de la superficie de rodadura del pavimento

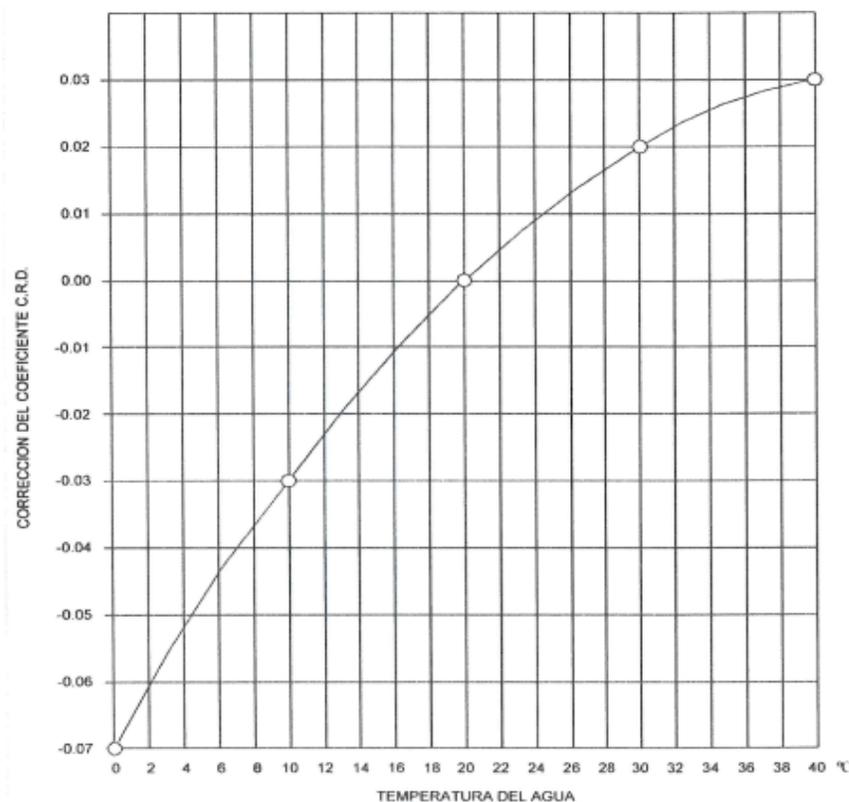
- Especificaciones para nuevas construcciones
- Investigación de accidentes
- Medición para mantenimiento de carreteras en época de invierno.

La unidad que mide el coeficiente de roce del pavimento es el BTN - British Pendulum Number (Número de Péndulo Británico), el cual tiene un rango que va desde 0 a 100. Los resultados de los ensayos se expresan en tanto por uno, de la siguiente manera:

$$CRD = \frac{\text{Textura efectiva de BPN}}{100}$$

En la siguiente figura se muestra la corrección del coeficiente obtenido, para expresar los resultados a 20°C, debido a lo siguiente: “las medidas efectuadas sobre los pavimentos siempre están afectadas por las variaciones de temperatura de la zapata y de la superficie ensayada, lo cual las uniformidades de las medidas se realizan bajo cualquier condición climática exigiendo los coeficientes de corrección”.

Figura 8. Corrección del coeficiente de resistencia al deslizamiento a 20°C.



Fuente: (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2017).

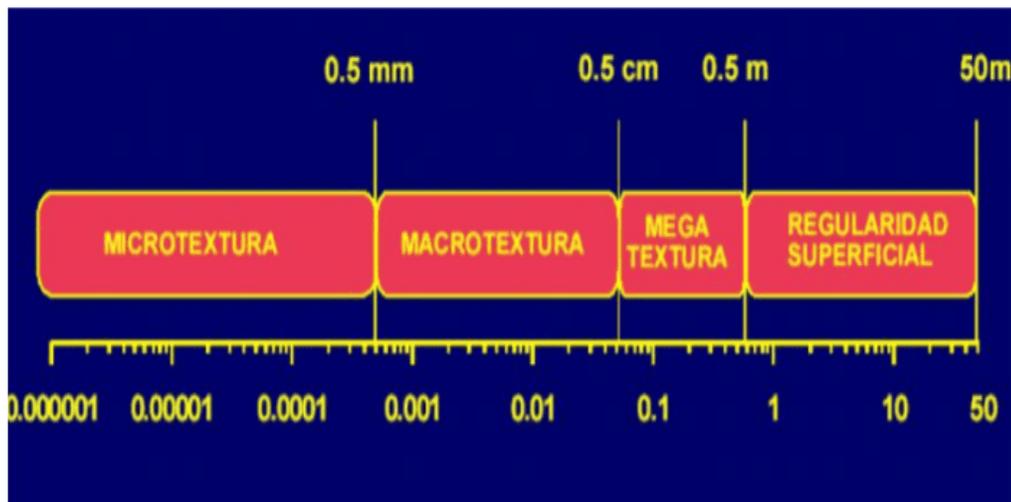
2.12. Textura superficial del pavimento – Círculo de Arena.

Definida como la característica geométrica de la superficie de la carpeta de rodadura conformada por la unión de agregado y asfalto. definida como “la geometría más fina del perfil longitudinal de una carretera” (Archútegietal, 1996).

Según (Robinson, Wahr, & Arancibia Galea, 2003) define a la textura superficial del pavimento como “la característica que debe tener la carpeta de rodadura para alcanzar un nivel de seguridad en su resistencia al deslizamiento ya sea al momento de frenado, controlando al vehículo en zona de curvas o en diferentes maniobras”.

De acuerdo con (AIPCR – 1995) “Asociación Internacional de Congreso de Carreteras”, la textura superficial se clasifica en: megatextura, macrotextura y microtextura, que dependen de la longitud de onda, como se muestra en la siguiente imagen:

Figura 9. Clasificación del perfil según la AIPCR.



Fuente: (Asociación Internacional de Congreso de Carreteras, 1995).

Tabla 7. Clasificación de textura superficial según AIPCR

Textura	Longitud de onda
Mega Textura	50 – 500 mm
Macro Textura	0.5 – 50 mm
Micro Textura	0.0 – 0.5 mm

Fuente: Asociación Internacional de Congreso de Carreteras

Según (Roco H, Fuentes L, & Valverde P, 2016) “la longitud de onda de textura está definida como la distancia mínima existente entre partes de la curva que se repiten periódicamente en dirección longitudinal al plano del pavimento”.

A lo largo de distintos estudios, llegaron a la conclusión que los factores que dependen de un pavimento para lograr niveles adecuados de fricción entre un neumático dependen de dos, la macrotextura y microtextura.

La diferencia entre macrotextura y microtextura es que ésta última influye en la fricción, mientras que la macrotextura en la capacidad de evacuación del agua, lo que a su vez ayuda a mejorar la fricción.

(Pagola, 1995) explica que “es de suma importancia evacuar el agua de la superficie de rodadura de un pavimento, de tal manera que exista un mayor contacto entre el neumático del vehículo y el pavimento”.

2.12.1. Círculo de arena

Con el siguiente ensayo, se logra: “determinar la profundidad de la macrotextura de la superficie del pavimento, mediante la aplicación de un volumen conocido de material y subsecuente medición del área total cubierta por éste”. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2017, pág. 989)

La presente metodología es adecuada para ensayos in-situ con lo cual se pretende calcular el promedio de profundidad de macrotextura de una superficie de un pavimento. “El conocimiento de la profundidad de macrotextura del pavimento sirve como herramienta para caracterizar la textura de la superficie. Cuando es utilizado conjuntamente con otros ensayos, los valores de profundidad de macrotextura derivados de este método pueden ser utilizados para determinar las capacidades de resistencia al deslizamiento del pavimento”, es el caso del presente trabajo de investigación, se realizó conjuntamente con el ensayo del péndulo británico. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2017, pág. 989)

Para los cálculos del ensayo, se presenta a continuación la siguientes formulas:

Para el volumen interno del cilindro:

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4}$$

Donde:

V: Volumen interno del cilindro, mm³.

D: Diámetro interno del cilindro, mm³.

h: Altura del cilindro, mm³.

Para el promedio de profundidad de macrotextura del pavimento, se utiliza la siguiente ecuación:

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

Donde:

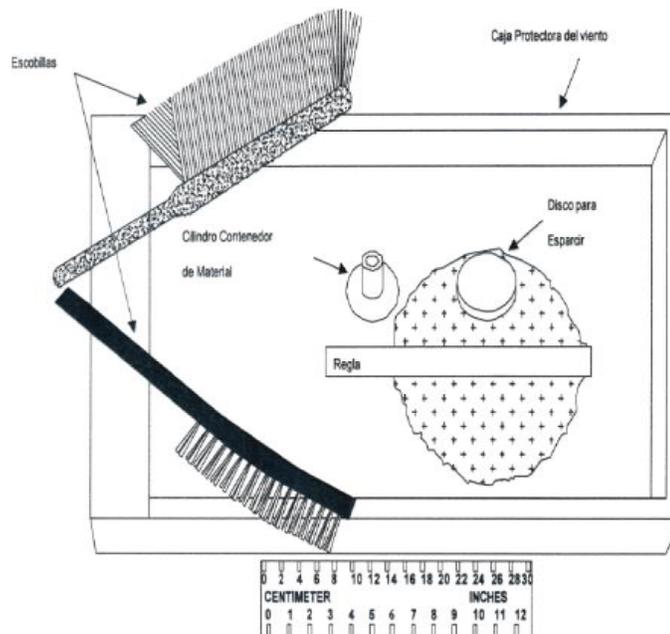
MDT: Profundidad media de macrotextura, mm.

V: Volumen de arena utilizada, mm³

D: Diámetro promedio del área cubierta por la arena, mm.

En la siguiente figura, se muestra los instrumentos para realizar dicho ensayo:

Figura 10. Instrumentos para medir la profundidad de macrotextura.

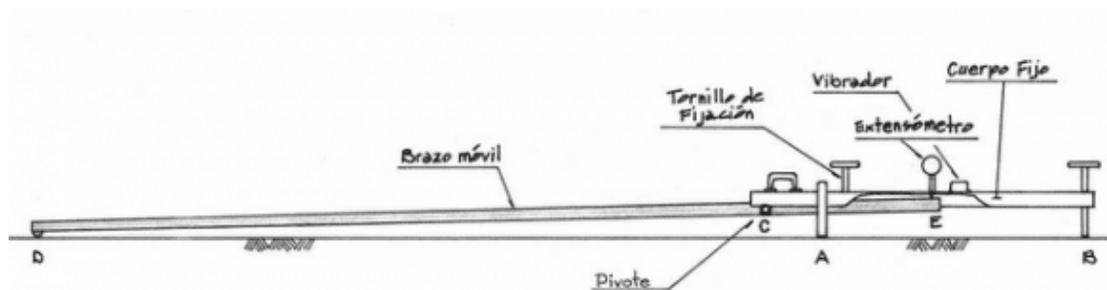


Fuente: (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2017).

2.13. Viga Benkelman

El deflectómetro Benkelman es completamente mecánico y funciona como palanca ver figura 11.

Figura 11. Viga Benkelman.



Fuente: Imagen web.

La viga comprende dos partes. La primera parte comprende un cuerpo fijo que se sitúa en el terreno mediante tres apoyos, dos de ellos fijos en el punto “A” y uno trasero regulable en el punto “B”. La segunda parte consta de un brazo móvil, el cual se encuentra acoplado a una articulación de giro en el punto “C”, uno de los extremos de este brazo (DE) se encuentra en el punto “D” apoyado sobre el terreno, el otro extremo se encuentra en contacto con un extensómetro de movimiento vertical en el punto “E” (MTC, Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).

2.13.1. Generalidades de evaluación estructural

En esta tesis se presenta una estrategia de intervención para la rehabilitación y mantenimiento de pavimentos flexibles de la red local. Principalmente se parte de una evaluación superficial y estructural usando viga Benkelman, Péndulo Británico y Mancha de Arena.

De esta manera se obtiene los parámetros estructurales que permiten realizar un análisis del estado del pavimento y concretar la necesidad de una intervención. Ante una necesidad de intervención se propone diseñar una carpeta delgada de espesor 4cm, universalmente conocida como recapeo.

2.13.2. Deflexión de un pavimento flexible – viga Benkelman.

Según el (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2017), define a la deflexión como “deformación elástica que sufre un pavimento bajo la acción de una carga rodante normalizada” (p. 962), por medio de la cual es factible determinar el agotamiento adelantado de la estructura a causa de las cargas efectuadas por el tránsito vehicular.

Las deflexiones causadas en la carpeta asfáltica de la vía, por acción de las cargas de los automóviles, podrían ser establecidas haciendo uso de deflectómetros tales como el reconocido ensayo “Viga Benkelman”, denominado así en honor al Ing. A.C. Benkelman, quién fue el que desarrolló en el año 1953 como aporte al programa de ensayos viales de la Western Association of State Highway Officials (WASHO Road Test).

“Desde entonces el uso ha sido difundido ampliamente en diversos proyectos de evaluación estructural de pavimentos flexibles, tanto por su practicidad como por la naturaleza directa y objetiva de los resultados que nos proporciona”. (Hoffman & Del Aguila, 1985, pág. 15)

El campo de aplicación del ensayo de la viga Benkelman es muy extenso, empleándose de manera principal en: “determinar la vida útil permanente de un pavimento, evaluar estructuralmente los pavimentos con fines de mantenimiento, mejoramiento o rehabilitación, evaluar los métodos de diseño de los pavimentos y el control de ejecución de obras, del mismo modo evaluar el debilitamiento progresivo de la estructura debido a las solicitantes del tránsito que lo utiliza, y finalmente para poder establecer si el pavimento presente suficiencia sin presentar fatiga estructural de manera creciente”. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2017, pág. 962)

De acuerdo (Administradora Boliviana de Carretera), los valores de deflexión serán comparados con el valor límite admisible, que está definida como: “la deflexión tolerable que garantiza un comportamiento satisfactorio del pavimento en relación con el tráfico que debe soportar, para las normas”, se han adoptado la relación propuesta para el paquete estructural del pavimento, llegando a la siguiente formula:

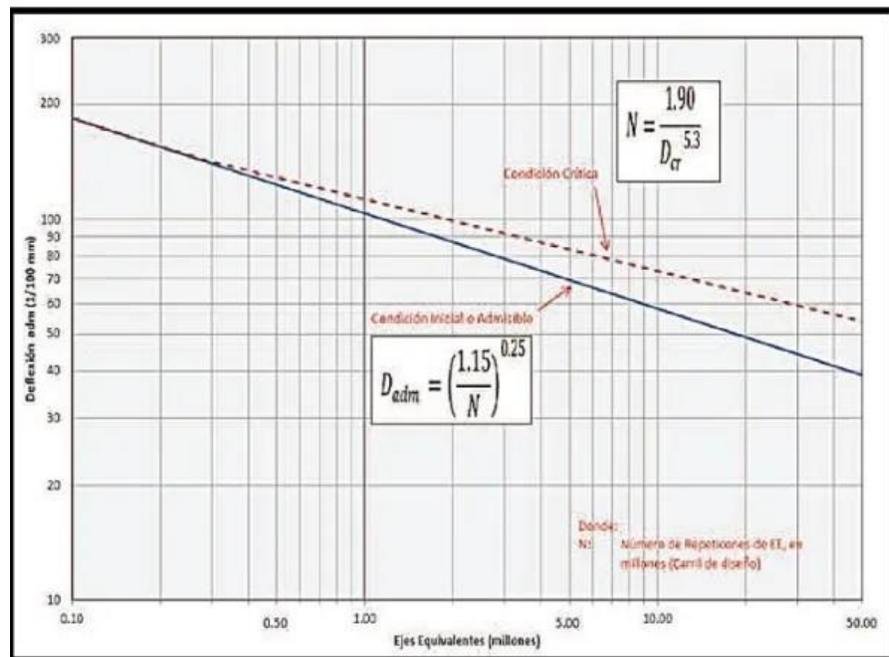
$$D_{adm} = \left(\frac{1.15}{N}\right)^{0.25}$$

Donde:

D_{adm} : Deflexión admisible en mm (a comparar con deflexiones viga Benkelman).

N : Número de repeticiones de eje equivalente en millones.

Figura 12. Gráfico de deflexiones admisibles



Fuente: (Administradora Boliviana de Carretera)

En el gráfico mostrado, las deflexiones características y admisibles serán comparadas mediante un análisis combinado de los resultados de la evaluación, presentándose una serie de posibilidades que serán analizadas con la finalidad de: “establecer la capacidad estructural del pavimento existente en relación al tráfico y cargas vehiculares que recibe dicha estructura, para luego definir si la estructura del pavimento es adecuada o sólo requiere de algún tipo de mantenimiento superficial, o se encuentra fatiga requiriendo un esfuerzo estructural, o la estructura se encuentra deficiente y requiere una reconstrucción parcial o total”.

2.14. Diseño de carpeta delgada para recapamiento

2.14.1. Agregados para Carpetas Delgada

La importancia técnica y económica de los áridos en la construcción de carreteras radica en el hecho que el resultado final estará íntimamente condicionado por la selección de los áridos.

En definitiva, la selección de los agregados para su uso en pavimentos depende de la disponibilidad, costo, y calidad del material tanto del tipo de construcción proyectada, dichos argumentos justifican la necesidad de estudiar su comportamiento en el laboratorio a fin de valorar la calidad del material (agregado pétreo). Hay que determinar cuáles entre los áridos disponibles a un costo adecuado cumplen con las especificaciones vigentes, además su extracción no debe ocasionar problemas de índole ambiental que alteren significativamente el mismo.

En la capa de rodadura se requieren agregados con gran resistencia al desgaste y durabilidad utilizando preferentemente árido de grano grueso como ser granitos y otras rocas ígneas.

Los áridos pueden identificarse por los siguientes aspectos que definen sus caracteres:

- Procedencia.
- Naturaleza.

2.14.1.1. Procedencia

Los áridos naturales, derivados de una o de otra forma de la disgregación de las rocas son los materiales habituales en la elaboración de carreteras. Se extraen en yacimientos (areneros, graveras, etc.) de origen fluvial, eólico o marino y en canteras abiertas en formaciones rocosas.

Estos áridos son clasificados por el equipo adecuado de tal manera de que estos se enmarquen en las normas establecidas y cumplan con todos los requerimientos técnicos exigidos por las normas AASTHO (American Association of State Highways and Transportation Officials, USA), y ASTM (American Society for Testing) IRAM (Normas del Instituto de Racionalización de Materiales, Argentina) para los agregados,

NLT (Normas de ensayos redactadas por el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo del Centro de Estudios y Experimentación del Ministerio de Obras Publicas Cedex- España) y VN-E (Normas de Ensayo de la Dirección Nacional de Vialidad, Argentina).

2.14.1.2. Naturaleza

Las características físicas de los áridos a ser empleados en el estudio que son requeridas para su empleo en las carpetas asfálticas, están relacionadas con la naturaleza mineralógica de las rocas de origen. Aunque parece clara a priori la idoneidad de determinados materiales pétreos duros como las cuarcitas, por ejemplo, los criterios económicos son los que más influyen en la elección final. El empleo de cada tipo de árido depende fundamentalmente de su disponibilidad en zonas relativamente cercanas a la obra. Para ello, es normalmente que en cada zona se utilicen casi siempre los mismos áridos locales cuya idoneidad ha sido sancionada por las experiencias de obras anteriores.

2.14.2. Determinación de las Cantidades de Agregados

Para determinar las dosificaciones de los agregados, se debe tener en cuenta los espesores de la carpeta asfáltica a ser diseñada en la carretera de estudio y al mismo tiempo se debe tomar en cuenta los diámetros máximos establecidos de acuerdo a las normas, en lo cual se establece que “El tamaño máximo del agregado pétreo no deberá ser mayor que las $2/3$ partes del espesor de la carpeta proyectada”, por lo que se proyecta de la siguiente manera:

De acuerdo a las Normas establecidas y recomendaciones del Subcomité de Estudios CPA (Comisión Permanente del Asfalto), establece que las Mezclas Asfálticas de carpetas de rodadura de bajo espesor son de (≤ 4 cm.) y se tiene un tamaño máximo de agregados de 12mm. (1/2”).

Tomando en cuenta estas recomendaciones, para fines de diseño y colocación en obra, se adopta un espesor de 4cm. con un tamaño máximo de agregado de 12mm., para la mezcla asfáltica a ser diseñada en el tramo de estudio.

El diseño de Carpetas Asfálticas de bajo espesor (Carpetas delgadas) se tomará en cuenta la granulometría establecida por la (Comisión Permanente del Asfalto) C.P.A. (Argentina), el mismo que usan las normas IRAM descritas seguidamente.

Tamaño Máximo del agregado para una mezcla normal:

$$T_{max} = E * \left(\frac{2}{3}\right) = 2,6667 \text{ Cm} = 1\text{Pulg.}$$

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se puede concluir en que se puede elegir agregados con tamaños máximos hasta de 1 Pulg., y como recomendaciones por parte del Subcomité de Estudios CPA, un tamaño máximo de 12mm., (1/2”), Por lo tanto, se tomarán en cuenta las granulometrías recomendadas por la CPA para carpetas asfálticas de bajo espesor de acuerdo a la Tabla 8.

Seguidamente se muestra las gráficas de las curvas de las mezclas de bajos espesores, las mismas que cuentan con tamaños máximos de hasta 19mm (3/4”), de tal manera que cumplen con las exigencias que fueron descritas anteriormente.

La curva granulométrica de nuestros agregados tiene que estar dentro de la gradación CAC D 12 para que cumpla las condiciones establecidas para el diseño de la carpeta delgada del tramo.

Tabla 8. Agregados para el Diseño del Tramo Vial

Tamices/IRAM		GRADACIÓN CAC D 12	
Nº	m.m.	INFERIOR	SUPERIOR
(3/4”)	19,000	100	100
(1/2”)	12,500	80	95
(3/8”)	9,500	72	87
(Nº4)	4,750	50	65
(Nº8)	2,360	35	50
(Nº30)	0,600	18	30
(Nº50)	0,300	13	23
(Nº200)	0,075	5	8

Fuente: Comisión Permanente del Asfalto-Argentina.

Se muestran la tabla del agregado que fue seleccionado para el diseño de la carpeta asfáltica tomando en cuenta las especificaciones de la C.P.A. (Comisión Permanente del Asfalto-Argentina).

Para determinar las dosificaciones de los agregados, se deben tener en cuenta los ensayos previos de los materiales a ser empleados en la mezcla asfáltica, los mismos que son:

Ensayos de Agregado Grueso, Intermedio y Fino

Para proceder al diseño de las mezclas asfálticas, se debe realizar los ensayos del agregado de GRADACIÓN CAC D 12 especificado anteriormente, los mismos que describimos de la siguiente manera:

- Ensayos de Caras Fracturadas.
- Desgaste en la máquina de Los Ángeles.
- Durabilidad de Agregados (Sulfato de Sodio), AASHTO T-104; ASTM C-88.
- Equivalente de Arena / AASHTO T-176.
- Peso Específico y Absorción / Agregado Fino.
- Peso Específico y Absorción / Agregado Grueso.
- Análisis Granulométrico Agregado fino, Intermedio y Grueso.

2.14.3. Requisitos de los materiales pétreos

En general, los materiales pétreos para carpetas asfálticas deben llenar los siguientes requisitos:

- a) No deben agregarse materiales pétreos que presenten más del 35% en peso, de fragmentos en forma de lascas o que tengan marcada tendencia a romper en forma de lascas cuando se les tritura. Generalmente se consideran como lascas las que tengan una longitud mayor de tres veces la dimensión menor del agregado.
- b) No deben emplearse agregados pétreos que contengan materia orgánica en forma perjudicial o arcilla en grumos.
- c) Los agregados pétreos no deben tener más del 20% de fragmentos suaves.

d) Los agregados pétreos deben emplearse de preferencia secos o cuando mucho con una humedad igual a la de absorción de ese material. En caso contrario, debe emplearse un adicionante en el asfalto.

e) El tamaño máximo del agregado pétreo no deberá ser mayor que las 2/3 partes del espesor de la carpeta proyectada.

f) Tener suficiente resistencia para soportar, sin romperse, las cargas del equipo de compactación.

g) La porción que pase la malla N^a 40 no debe tener una contracción lineal mayor de tres para materiales que, en mezcla en lugar, su granulometría caiga en la zona número uno, y del 2% si cae en la zona número dos. Para los concretos asfálticos la contracción lineal debe ser menor o igual a 2%.

h) Los materiales pétreos deben llenar características granulométricas tales que su curva gráfica debe quedar dentro de las zonas marcadas por las curvas, según sea el caso.

Se recomienda, para dar una superficie antiderrapante, usar siempre como curva de proyecto la curva inferior, o ligeramente más abajo, mostrada para los concretos asfálticos.

i) El desgaste determinado con la máquina de “*Los Ángeles*” no debe ser mayor de 40%.

j) La absorción del material pétreo no debe ser mayor del 5%.

k) La densidad aparente del material pétreo no debe ser menor del 2.3%.

l) El material pétreo debe tener buena adherencia con el asfalto, debiendo satisfacer una de las especificaciones siguientes:

1) Desprendimiento máximo por fricción, 2.5%.

2) Cubrimiento máximo con asfalto inglés, 90%.

3) Pérdida máxima de estabilidad, por inmersión en agua, 2.5%.

m) El material pétreo debe resistir la prueba de intemperismo acelerado.

2.14.4. Pruebas de laboratorios de los materiales pétreos para carpetas asfálticas

2.14.4.1. Peso Volumétrico Seco y Suelto

La obtención de peso volumétrico seco y suelto de los materiales pétreos para carpetas asfálticas tiene por objeto hacer conversiones de peso de material a volúmenes. La prueba se ejecuta de la siguiente manera. Se toma por cuarteos una cantidad determinada de la muestra representativa que se pretende ensayar y se seca y disgrega para luego llenar un recipiente de volumen conocido dejando caer el material desde una altura de unos 20 Cm. sin apretar dicho material en el recipiente y sin mover este para evitar que el material se acomode por los movimientos del recipiente. Concluido lo anterior el material se enraza dentro del molde y se pesa. A este peso se le resta el peso del recipiente y se le divide entre el volumen del mismo, obteniéndose así, el peso volumétrico seco y suelto de material pétreo.

2.14.4.2. Granulometría

La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de carpetas asfálticas, es de primordial importancia porque en función de ellas se puede conocer de antemano que clase de textura tendrá la carpeta. La prueba granulométrica se ejecuta de la siguiente manera:

Se pesa una determinada cantidad obtenida por cuarteos de la muestra representativa y se pasa por las mallas de 1" (25.40mm.), $\frac{3}{4}$ " (19.05mm.), $\frac{1}{2}$ " (12.70mm.), $\frac{3}{8}$ " (9.52mm), $\frac{1}{4}$ " (6.35mm), #4(4.76mm), #10(2.00mm), #20(0.840mm), #40(0.420mm), #60(0.250mm), #100(0.149mm), #200(0.074mm), anotándose los retenidos en cada malla. Se calcula el retenido parcial con respecto a la muestra ensayada. Seguidamente con estos últimos datos se procede a dibujar la curva granulométrica del material y se analiza según las especificaciones si estos porcentajes son adecuados o no para la ejecución de las carpetas asfálticas.

2.14.4.3. Densidad y absorción

Para efectuar las pruebas de densidad y absorción, se toma el material retenido en el tamiz de $\frac{3}{8}$ " y se pone a saturar durante 24 Horas, después de lo cual se extrae del agua y se seca superficialmente con un lienzo absorbente e inmediatamente se pesa, (Ph).

En esas condiciones se sumerge el material en un picnómetro con agua y se observa que cantidad de ella desaloja, anotándose dicho volumen de agua como “V”. Se extrae el material y se pone a secar en un horno durante 12 Horas a temperatura de 100 a 110 °C. Después de ello se saca el material del horno, se deja enfriar y se pesa obteniéndose el peso seco, “Ps”. Con estos datos se obtiene la densidad y la absorción del material de la siguiente manera:

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{P_s}{V} \quad \% \text{ de Absorción} = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100$$

Los resultados obtenidos se comparan con las especificaciones correspondientes.

2.14.4.4. Resistencia al Desgaste

La estimación más comúnmente aceptada de la dureza de los agregados es la prueba de abrasión de “*Los Ángeles*”; la cual consta de la siguiente manera.

La muestra a ensayar se lava para eliminar el polvo que tenga adherido y luego se seca a peso constante en un horno y después se criba a través de las mallas 3”, 2 – ½”, 1 – ½”, 1”, ¾”, ½”, #3, #4, #8, #12 para conocer su graduación. Luego se emplea una cantidad determinada de cada tamaño para ejecutar la prueba, así como el peso en Kg. De la carga abrasiva y el número de revoluciones que deberá darse a la máquina. La muestra seleccionada se pesa con un peso P1, se coloca junto con las esferas en la máquina y ella se hace girar hasta completar las revoluciones especificadas. Se saca la muestra de la máquina y se lava a través de la malla #12 secando retenido de esta en un horno y se pesa P2, La pérdida por desgaste se determina de acuerdo a la siguiente relación:

$$\% \text{ de Desgaste} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

2.14.4.5. Adherencia con el Asfalto

Esta prueba tiene por objeto el conocer si el material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de carpetas es de características hidrofílicas o hidrofóbicas. Se dice que un material es hidrofílico cuando tiene más afinidad por el agua que por el asfalto,

e hidrofóbico en caso contrario. Si un material empleado para formar carpeta asfáltica es hidrofílico, dicho material atraerá al agua y desalojará a la película de asfalto que lo recubre y por lo tanto quedará destruida la adherencia entre el agregado y el asfalto y por ende se presentará la falla de la carpeta por la pérdida de estabilidad al separarse del asfalto.

La falta de adherencia del asfalto con el material pétreo puede presentarse por la presencia de una película fina de polvo adherido al material pétreo o debido a las características hidrofílicas del material que no es más que un fenómeno de tensión superficial entre las fases agregado-asfalto-agua.

Las características hidrofílicas de un material pétreo pueden ser modificadas empleando agentes químicos con lo cual se mejora mucho la adherencia del material con el asfalto. Para conocer si un material tiene una buena o mala adherencia con un determinado asfalto, debe efectuarse la prueba de ***Desprendimiento por fricción***; cuyo procedimiento consiste en verificar por duplicado la prueba de desprendimiento por fricción, tomando como testigo un material que haya comprobado tener buena afinidad con el asfalto.

De la mezcla preparada en las mismas condiciones como se empleará en las obras, se toman unos 300 gr. Y se coloca en un frasco de vidrio y se le agrega agua hasta cubrir dicha mezcla, dejándola en reposo durante 24 Horas. Si después de ese tiempo el desprendimiento del asfalto del agregado es de consideración, el material puede clasificarse como ***altamente hidrofílico***.

Si no ha ocurrido un desprendimiento apreciable de la película de asfalto, el frasco con su contenido deberá agitarse vigorosamente por tres periodos de 5 minutos cada uno, debiendo examinarse la mezcla dentro del frasco después de cada agitada de 5 minutos. Si no se nota un desprendimiento al terminar el 3er. Periodo de agitación, o que haya habido un desprendimiento ligero comparada al del testigo, puede considerarse como ***adherencia normal con el asfalto***. En caso contrario se dará que el material tiene ***adherencia regular o baja***, según sea el desprendimiento ocurrido del asfalto siendo necesario aumentar dicha adherencia, ya sea empleando un adiconante o tratando de

ver si dicha adherencia se mejora cambiando el tipo de asfalto, triturando el material a un tamaño menor o lavando al agregado pétreo.

2.14.4.6. Contracción Lineal

La contracción lineal de los finos del material pétreo, nos indica la presencia de mucha o poca actividad de la arcilla que contenga. Si la arcilla se presenta en forma de película delgada adherida al material pétreo, provoca una baja adherencia del asfalto con el agregado pétreo. Si la arcilla se encuentra en grumos o terrones, serán puntos débiles y de falla de la carpeta, en presencia del agua. La contracción lineal es la disminución en una dimensión de la masa del suelo expresada como un porcentaje de la dimensión original, Cuando su contenido de humedad se reduce desde una cantidad igual a la humedad del límite líquido del material hasta del límite de contracción del mismo.

2.15. Asfaltos

El asfalto es un elemento químico que se genera de la destilación o refinación del petróleo, o, dicho de otra manera, es una sustancia de color negro, cementante, que constituye la fracción más pesada del petróleo crudo, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a las temperaturas ambientes normales.

Para la producción de los asfaltos adecuados y utilizados en la construcción de caminos, existen diferentes variedades de procesos de refinación. No obstante, se puede decir que los asfaltos se obtienen en general por destilación y por inyección de aire a altas temperaturas; por ejemplo, existe la destilación fraccionada, destilación destructiva y destilación con vapor; de la misma manera los procesos de refinación pueden ser mediante el fraccionamiento térmico, refinación al aire, etc.

El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo. Es capaz de resistir considerables esfuerzos instantáneos, aun que fluye siempre bajo la acción de las cargas permanentes. Para establecer algunas de las propiedades que tienen que cumplir los asfaltos en las carreteras, citaremos algunas de sus funciones:

Impermeabilizar la superficie del camino.

- No debe disgregarse bajo la acción del tráfico o los agentes atmosféricos.

- Debe ser estable, resistiendo las deformaciones producidas por las cargas que lo solicitan, no deben producirse en el mismo huellas ni ondulaciones.
- Finalmente debe ser económico, o sea que hay que emplear los materiales menos caros capaces de producir un pavimento estable, duradero y antideslizante.

Los asfaltos usados en la pavimentación, generalmente llamados *Cemento Asfáltico (CA)*, es un material viscoso, que se adhiere fácilmente a las partículas de agregado, cuyas propiedades físicas y químicas los hacen aptos para múltiples aplicaciones de diversos tipos.

2.15.1. Ensayos de los asfaltos que se deben efectuar

Los asfaltos deben ser sometidos a pruebas de laboratorio con el fin de conocer sus características y ver si se encuentran dentro de las especificaciones marcadas por la fuente de producción.

Las pruebas básicas para determinar las propiedades del cemento asfáltico son las siguientes: Viscosidad, penetración, Destilación, Contenido de agua, Punto de inflamación o Ignición, Punto de fisión, Ductilidad, Solubilidad, Pérdida por calentamiento, el ensayo al horno de película delgada.

2.16. Mezclas asfálticas y diseños

Una mezcla asfáltica se compone de material pétreo mezclado con asfalto. El material pétreo comúnmente llamado “Agregado”, se clasifica en “agregado grueso”, “agregado fino”, “relleno mineral” (filler) y “polvo mineral”.

En un pavimento flexible uno de los aspectos más importantes es la determinación de la mezcla asfáltica con la cual está compuesta dicha carpeta.

Para la determinación del contenido de Cemento asfáltico (C.A.) en las mezclas asfálticas, se determinan:

- 1) El contenido mínimo de Cemento asfáltico.
- 2) El contenido óptimo de Cemento asfáltico.

2.16.1. Contenido mínimo de cemento asfáltico

Antes de desarrollar una mezcla asfáltica en laboratorio tiene que estar establecido el porcentaje de C.A., para ello se sigue el procedimiento que se indica en la determinación del contenido mínimo, para lo cual existen dos metodologías:

- Método del Área Superficial.
- Método de la Distribución de Agregados.

2.16.1.1. Método del área superficial

Este procedimiento es aplicable a materiales graduados que contengan cierta cantidad de finos. Primeramente, conociendo la composición granulométrica del material pétreo se calcula el contenido de cemento asfáltico empleando el método que a continuación se indica:

Este método se basa en encontrar el contenido mínimo de C.A. en función a las áreas superficiales de las partículas o sea que, se estima la superficie de los agregados pétreos por cada kilogramo de material. Para hacer dicha estimación, se determinó un área superficial unitaria para cada uno de los tamaños que intervienen en la mezcla, haciendo uso de las siguientes constantes de área en metros cuadrados por kilo de material pétreo, cuyos valores son:

Material pasa malla 1-1/2"	y se retiene en 3/4"	0.27	m ² /kg.	Material
Material pasa malla 3/4"	y se retiene en #4	0.41	m ² /kg.	Material
Material pasa malla #4	y se retiene en #40	2.05	m ² /kg.	Material
Material pasa malla #40	y se retiene en #200	15.38	m ² /kg.	Material
Material pasa malla #200		53.30	m ² /kg.	Material

Cada una de estas constantes se debe multiplicarse por los porcentajes de partículas entre las mallas correspondientes, dando por resultado que se obtengan determinadas superficies por Kilogramo de material. Se suman todas las superficies calculadas y el resultado se multiplica por el índice asfáltico que varía entre 0.0055 a 0.01385, de acuerdo con la rugosidad y la porosidad de los agregados.

El porcentaje de cemento asfáltico (C.A.) obtenido debe convertirse a *Producto Asfáltico*, ya sea un rebajado o una emulsión asfáltica, que se vaya a emplear, tomando en cuenta el contenido de residuo asfáltico del mismo.

A continuación, se anotan los índices asfálticos más comunes:

Tabla 9. Índice Asfáltico Método del Área Superficial.

Material Pétreo	Índice Asfáltico
Gravas y arenas o materiales redondeados de baja absorción.	0.0055
Gravas angulosas o redondeadas, trituradas de baja absorción.	0.0060
Gravas angulosas o redondeadas, de alta absorción y rocas trituradas de mediana absorción.	0.0070
Rocas trituradas de alta absorción.	0.0080

Fuente: Elaboración propia.

Se considera una absorción como baja a la que es menos que el 2%, absorción mediana a la comprendida entre 2% y 4%, absorción alta a la absorción mayor de 4%, el Porcentaje de Cemento Asfáltico debe emplearse únicamente como guía para la determinación práctica por medio de la “**Prueba de Compresión Axial no Confinada**” que más adelante se indica.

Lo dicho con anterioridad puede expresarse en la siguiente fórmula:

$$P = (0.4 \ln G + 0.25ng + 15.38nA + 53.30nF)$$

Donde:

P= Porcentaje mínimo de Cemento Asfáltico (C.A.).

n= Índice asfáltico según la absorción del material.

G=Porcentaje de material entre la malla $\frac{3}{4}$ " y la # 4.

g=Porcentaje de material entre la malla # 4 y la # 40.

A=Porcentaje de material entre la malla # 40 y la # 200.

F=Porcentaje de material que pasa a la malla # 200.

2.16.1.2. Método de la distribución del tamaño de las Partículas o agregados

Este método tiene por objeto, establecer el contenido mínimo de Cemento Asfáltico (C.A.) en base a la distribución de sus agregados en tres cortes divididos por sus tamices #10 y #200, estableciéndose la siguiente relación:

$$P = 0.020a + 0.045b + cd$$

Donde:

P= Porcentaje de Cemento asfáltico expresado con respecto al material.

a= Porcentaje de material retenido en la malla #10.

b= Porcentaje de material que pasa la malla #10 y se retiene en la #200.

c= Porcentaje de material que pasa la malla #200.

d=Coeficiente asfáltico que varía con las características del material de acuerdo con los datos de la siguiente tabla:

Tabla 10. Coeficientes asfálticos método de la distribución de partículas.

Material Pétreo	Índice Asfáltico “d”
Gravas y arenas de río o materiales redondeados de baja absorción.	0.15
Gravas trituradas de baja absorción.	0.20
Rocas trituradas de mediana absorción.	0.30
Rocas trituradas de alta absorción.	0.35

Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de cemento asfáltico (C.A.) obtenido debe convertirse a *Producto Asfáltico*, ya sea un rebajado o una emulsión asfáltica, que se vaya a emplear, tomando en cuenta el contenido de residuo asfáltico del mismo.

2.16.2. Contenido óptimo de cemento asfáltico

Para establecer el contenido óptimo de Cemento Asfáltico en una mezcla asfáltica, se realiza en base al Contenido Mínimo ya determinado, a partir del cual se realizan varios ensayos en laboratorio a fin de establecer el Contenido Óptimo, para ello se tienen varios métodos, pero solamente se tomarán en cuenta Método Marshall.

- Por medio del Método Marshall.

2.16.2.1. Prueba mediante el método de Marshall

Este método es utilizado tanto en el diseño como en el control de las mezclas asfálticas elaboradas en planta estacionaria, en caliente, empleando cemento asfáltico. Su función primordial es determinar una mezcla asfáltica que se encuentre dentro de las especificaciones técnicas más óptimas respecto a la estabilidad, fluencia, peso volumétrico, porcentaje de vacíos y porcentaje de huecos ocupados por el cemento asfáltico.

Con la prueba de Marshall, se determinan los valores de estabilidad y de flujo en especímenes cilíndricos, compactados axialmente con un sistema determinado y probados a 60° C. El valor de estabilidad se determina midiendo la carga necesaria para producir la falla del espécimen, aplicada en sentido normal a su eje. La deformación vertical producida en el espécimen por dicha carga será el vapor del flujo. El valor de estabilidad expresa la resistencia estructural de la mezcla compactada, y está afectado principalmente por el contenido de asfalto, la composición granulométrica y el tipo de agregado. Principalmente el valor de estabilidad es un índice de la calidad del agregado. El valor del flujo representa la deformación requerida, en el sentido del diámetro del espécimen, para producir la fractura. Este valor es una indicación de la tendencia de la mezcla para alcanzar una condición plástica, y consecuentemente de la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica a deformarse bajo la acción de las cargas impuestas por los vehículos.

a) Equipo necesario mínimo

El equipo necesario para la elaboración de los especímenes es el siguiente:

- Un molde de compactación provisto de un collarín y de una placa de base, un sostén de molde de compactación para sujetar firmemente el mismo
- Un pisón de compactación con superficie circular de apisonado de 9.84cm (1.7/8") de diámetro, equipado con una pesa deslizante de 4.536 kilogramos (10 lbs.) cuya altura es de 45.7cm (18").
- Una máquina de compresión Marshall accionada con motor eléctrico que permite aplicar cargas por medio de una cabeza de prueba con forma de anillo seccionado a una velocidad de 5.08cm/min=2min. Está equipada con un anillo

calibrado para determinar el valor de las cargas y un extensómetro para medir las deformaciones del anillo.

- Un medidor de flujo, un tanque de saturación con dispositivo eléctrico para mantener constante la temperatura del agua.
- Hornilla eléctrica para calentar los agregados.
- Un termómetro blindado para registrar temperaturas entre 10 y 200° C.
- Una balanza con capacidad de 20kg y sensibilidad de 1 gramo.
- Una cuchara de albañil, un baño de agua para calentar el pisón de compactación y el molde.
- Una espátula y charolas.

b) Elaboración de los especímenes

Para la elaboración de los especímenes se sigue el procedimiento de la siguiente manera:

Fijada la granulometría de la mezcla asfáltica, se determina el porcentaje en peso de los siguientes tamaños que ha sido separado previamente el material pétreo:

Material retenido en la malla de 1/2"

Material que pasa la malla de 1/2" y se retiene en la malla de 1/4"

Material que pasa la malla 1/4" y se retiene en la malla # 10

Material que pasa la malla # 10 y se retiene en la malla # 40

Material que pasa la malla # 40

Para cada contenido de cemento asfáltico se fabrican tres especímenes cada uno de los cuales requieren 1200 gramos de agregado pétreo. Se toma de cada uno de los tamaños mencionados la cantidad de muestra que resulta de multiplicar el porcentaje en peso de cada fracción por el peso total de la muestra. Las fracciones ya pesadas se mezclan previamente a la adición del cemento asfáltico. La cantidad de cemento asfáltico que deberá agregarse a cada muestra se calcula sobre la base de contenido mínimo de Cemento Asfáltico que se calcula como ya se indicó anteriormente.

Las cantidades de Cemento Asfáltico deberán corresponder a los siguientes porcentajes de cemento asfáltico.

Contenido calculado -1.0 %

Contenido calculado neto

Contenido calculado + 0.5 %

Contenido calculado + 1.0 %

Contenido calculado + 1.5 %

Contenido calculado + 2.0 %

Se mezclan los agregados y el cemento asfáltico, calentados previamente a las temperaturas de 165° C y 120° C, respectivamente, hasta obtener una distribución uniforme del cemento asfáltico. La temperatura de la mezcla no debe ser menor de 100°C al momento de elaborar el espécimen. En ningún caso la mezcla deberá ser recalentada.

c) Compactación de los especímenes

Para compactar los especímenes se procede de la siguiente manera:

El pisón de compactación y el molde se calentarán en un baño de agua hirviendo. Una vez caliente se sacará el equipo del baño y se colocará un papel filtro en el fondo del molde y se llenará este con la mezcla caliente. Se apoyará el pisón sobre la mezcla y se aplican 50 golpes con la pesa deslizante. La cara del pisón será mantenida paralela a la base del molde durante el proceso de compactación. Se quitará el collarín y se invertirá la posición del molde; se colocará el collarín y se aplicarán otros 50 golpes en el espécimen. El proceso de compactación anteriormente descrito se aplicará al estudio de mezclas proyectadas para recibir presiones de contacto que no excedan de 7 kg/cm² (100lbs/pulg²). El número de golpes en cada cara del espécimen deberá aumentarse a 75 cuando las mezclas se proyecten para recibir presiones de contacto comprendidas entre 7 y 14 kg/cm² (100 a 200lb/pulg²). Se removerá el collarín y la placa de base, y el molde con su contenido se sumergirá en agua fría por un tiempo mínimo de 2 minutos. Se extraerá el espécimen del molde, se identificará y se dejará enfriar a la

temperatura ambiente 12 a 24 horas. Los especímenes compactados deberán tener una altura de 6.35cm (2 – ½”), con una tolerancia de 3.2mm (1/8”), y en caso contrario deberán repetirse el proceso.

d) Prueba a compresión de los especímenes

La prueba de los especímenes comprende la determinación del peso volumétrico y la determinación de la estabilidad y flujo de los mismos. La determinación del peso volumétrico del espécimen ya compactado se realizará dividiendo el peso entre el volumen. Los valores de estabilidad y flujo se determinarán ensayando los especímenes en el aparato Marshall, siguiendo el procedimiento siguiente:

Se sumerge el espécimen en el tanque con agua a la temperatura de 60° C con medio grado de tolerancia y se mantendrá ahí 20 a 30 minutos. Mientras los especímenes se encuentran en el tanque de agua, se limpia la superficie del anillo seccionado y se lubrica los postes guía de tal manera que la sección superior del anillo seccionado se deslice libremente, se ajustará a cero el extensómetro del anillo de carga. Terminando el periodo de inmersión en agua caliente se sacará el espécimen del agua y se secará su superficie. Se colocará el espécimen entre las dos secciones de cabeza de prueba y se centrará el conjunto en la máquina de compresión. Se colocará el medidor de flujo en el poste guía y se ajustará a cero su carátula. Se aplicará la carga del espécimen a una velocidad constante de 5cm/min. hasta que la falla del espécimen ocurra. La carga máxima aplicada para producir la falla del espécimen a la temperatura de 60° C se debe registrar como el valor de la estabilidad Marshall. Mientras la prueba se lleve a cabo se debe sostener firmemente el medidor de flujo sobre el poste guía y se removerá tan pronto se haya aplicado la carga máxima, anotándose la deformación sufrida por el espécimen. Esta lectura en milímetros expresa el valor del flujo. Se promedian los valores de estabilidad y de flujo de los tres especímenes con el mismo contenido de cemento asfáltico, debiendo desecharse para el cálculo el valor que discrepe notablemente.

La prueba anteriormente descrita debe completarse dentro de un periodo de 30 segundos contados a partir del momento en que los especímenes sean sacados del tanque de agua caliente.

La deformación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico se efectuará de acuerdo con el criterio siguiente:

- Se calculará el promedio del peso volumétrico de los especímenes de prueba elaborados con un mismo porcentaje de cemento asfáltico.
- Por el procedimiento se determinan las densidades teóricas máxima y el porcentaje de vacíos para cada contenido de cemento asfáltico.
- Se calcula la relación entre volumen ocupado por el cemento asfáltico y el volumen total de huecos que existirá si el material pétreo del espécimen no contuviera cemento asfáltico. Para este último se utilizará la siguiente fórmula:

$$V_o = \frac{D_r P_a \gamma}{100 D_r D_a - (100 - P_a) D_a \gamma} = \frac{\text{Volumen de C.A.}}{\text{Volumen total de huecos}}$$

$$\%V_o = \frac{D_r P_a \gamma}{100 D_r D_a - (100 - P_a) D_a \gamma} * 100 = \frac{\text{Volumen de C.A.}}{\text{Volumen total de huecos}}$$

En la que:

D_r =Densidad relativa aparente del material pétreo.

γ = Peso volumétrico del espécimen en gr/cm^3 .

D_a =densidad relativa del C.A. (1.3 aproximadamente).

P_a =Porcentaje de C.A. con relación al peso de la mezcla.

- Se corregirán los valores de estabilidad de los especímenes que no tengan la altura especificada de 63.5cm multiplicando los valores obtenidos por los valores de corrección que siguen:

Tabla 11. Factores de Corrección.

Altura del Especimen	Factor de Corrección	Altura del Especimen	Factor de Corrección
55	1.27	63.5	1.00
56	1.23	64.0	0.98
57	1.20	65.0	0.96
58	1.16	66.0	0.94
59	1.13	67.0	0.92

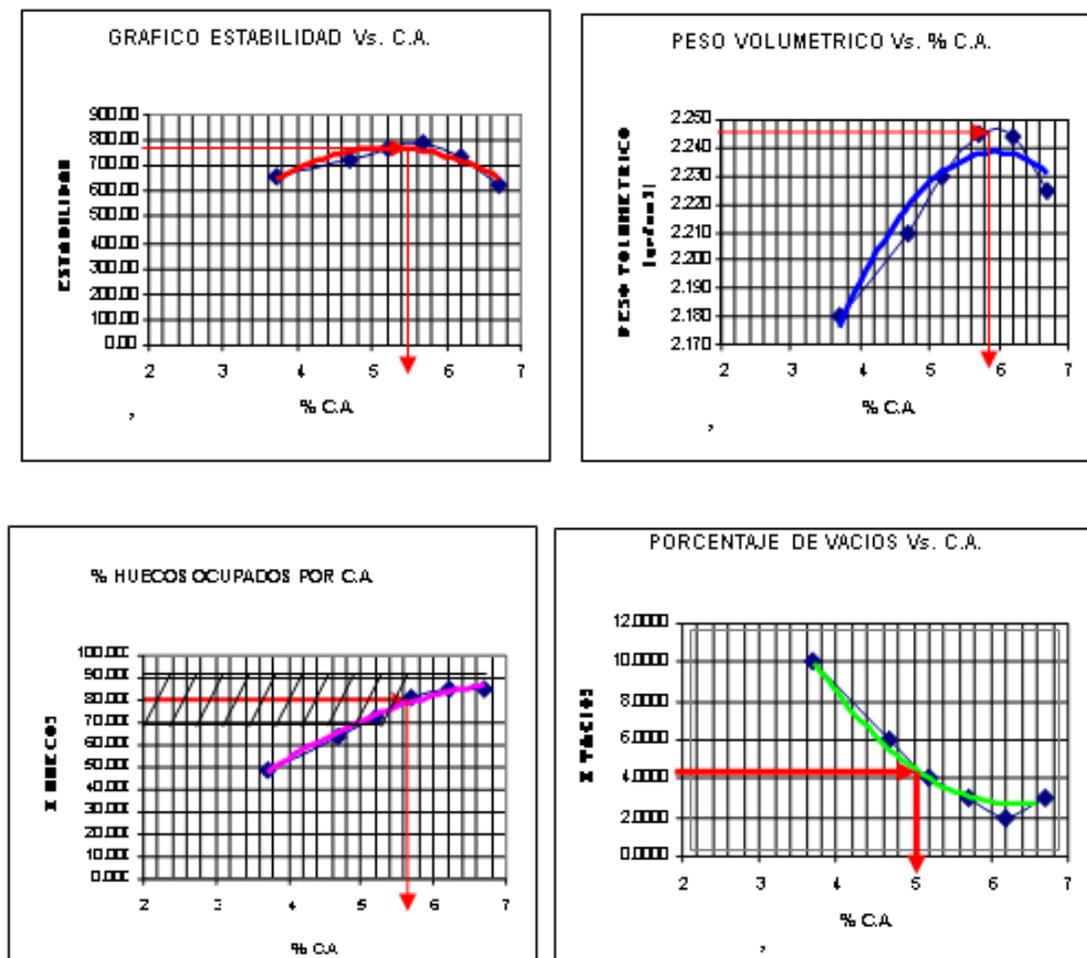
60	1.10	68.0	0.90
61	1.07	69.0	0.88
62	1.04	70.0	0.86
63	1.01	71.0	0.84

Fuente: Elaboración propia.

a) Se dibujan las gráficas siguientes:

- Peso volumétrico Vs. Contenido de cemento asfáltico.
- Estabilidad Vs. Contenido de cemento asfáltico.
- Flujo Vs. Contenido de cemento asfáltico.
- Porcentaje de vacíos Vs. Contenido de cemento asfáltico.
- Huecos ocupados por el asfalto Vs. Contenido de cemento asfáltico.

Figura 13. Graficas Método de Marshall.



Fuente: Guías de laboratorio.

- b) De los datos obtenidos de las gráficas indicadas, se calculará el contenido óptimo de C.A, promediando los siguientes valores.
- El contenido de C.A. correspondiente al mayor peso volumétrico.
 - El contenido de C.A. correspondiente a la máxima estabilidad.
 - El contenido de C.A. correspondiente al valor medio del porcentaje de vacíos señalados en la tabla que sigue:
 - El contenido de C.A. correspondiente al valor promedio del porcentaje de huecos ocupados por el C.A., señalados en la tabla que se indica a continuación.

Tabla 12. Especificaciones para Mezclas Asfálticas.

Especificaciones para mezclas con cemento asfáltico procedimiento Marshall				
Características	Uso de la mezcla asfáltica elaborada con cemento asfáltico	Para carreteras tránsito diario en ambos sentidos		Para Aero - pistas
		Hasta 2000 vehículos pesados (A)	Más de 2000 vehículos pesados (A)	
Número de golpes por cada		50	75	75
Estabilidad mínima, kilogramos	Para carpetas. Capas de nivelación.	150	700	700
Flujo en milímetros	Bases asfálticas y bacheo	2 - 4.5	2 - 4	2 - 4
Porcentaje en la mezcla respecto al volumen del espécimen (B)	Para carpetas y mezclas de nivelación.	3 - 5	3 - 5	3 - 5
	Para bases asfálticas	3 - 8	3 - 8	3 - 8
Porcentaje de vacíos en el agregado (VAM), respecto al volumen del espécimen de mezcla, de acuerdo con el tamaño máximo del material pétreo mínimo (B).	Para carpetas, capas de nivelación, bases asfálticas y bacheo.			
	4.76mm N°4	18	18	18
	6.35mm (1/4")	17	17	17
	9.51mm (3/8")	16	16	16
	12.7mm (1/2")	15	15	15
	19.0mm (3/4")	14	14	14
25.4mm (1")	13	13	13	

Fuente: Elaboración propia.

Nota. Se consideran vehículos pesados los camiones en todos los tipos y autobuses.

2.16.3. Mezclado en planta estacionaria

Los concretos asfálticos son mezclas elaboradas por peso en plantas estacionarias, calentado los agregados y empleando en su elaboración cementos asfálticos. Los concretos asfálticos, debido a la precisión de su dosificación resultan de alta calidad. El agregado pétreo para la mezcla es secado y calentado entre 135°C (275°F) y 177°C (350°F) en la planta antes de entrar en la mezcladora. Después de calentarlo, el agregado se cribará en los tamaños especificados que se depositarán en compartimientos, listos para ser mezclados con el cemento asfáltico. Una vez calentados y separados los diversos tamaños de agregado, se procederá a pesarlos exactamente, proporcionando sus cantidades de acuerdo a lo anteriormente explicado, de manera que la mezcla resultante se ajuste a la granulometría especificada. El material pétreo dosificado se introduce en la mezcladora y a continuación se añade el cemento asfáltico para proceder al mezclado. El cemento asfáltico se calienta en pailas o tanques apropiados que produzcan calentamiento uniforme; no deberá calentarse a más de 177°C (350°F). La cantidad del cemento asfáltico lo determina el laboratorio. La temperatura de la mezcla al salir de la mezcladora estará comprendida entre 135°C(275°F) y 177°C(350°F). El tiempo de mezclado se cuenta desde el momento que se termine de introducir el cemento asfáltico hasta que la mezcla salga de la mezcladora. En el caso de plantas de mezclado continuo, el tiempo de mezclado, en segundos, vendrá dado por la fórmula:

$$T = \frac{\text{Capacidad total de la planta en kilos}}{\text{kilos por segundo que salen de la planta}}$$

2.16.3.1. Transporte y distribución de la mezcla

La mezcla será transportada de la planta de mezclado al lugar de uso en camiones de volteo, que deberán limpiarse cuidadosamente para evitar que entren materias extrañas en la mezcla y untarse interiormente de aceite para evitar que la mezcla se adhiera. Los camiones tendrán una lona o encerado que cubra la mezcla mientras dure el transporte, en casos de tiempo inseguro o distancias a recorrer muy largas. La mezcla se descargará en la terminadora a una temperatura compendiada entre 275°F(135°C) y 350°F(177°C) y a una temperatura más bajas si un laboratorio lo autoriza, siempre que los resultados

del extendido y la compactación sean satisfactorios. La mezcla solo se atenderá sobre la base, cuando esta esté seca y las condiciones del tiempo lo permitan. Antes de empezar la operación, la base deberá barrerse o limpiarse por medio de aire a presión hasta que no quede ningún material suelto sobre la calzada.

La mezcla se esparcirá en fajas de 3 a 3.60 metros de ancho, en capas de espesor uniforme, por medio de una máquina terminadora con una velocidad de 3 a 6 m/min., que no produzca arranques o desgarramientos en la capa de mezcla asfáltica que se está extendiendo.

La colocación de la mezcla será tan continua como sea posible y las máquinas solo pasarán sobre un borde no protegido de una carpeta recién colocada, cuando la colocación de esta carpeta vaya a suspenderse por tanto tiempo que permita enfriarse a la mezcla.

Después de terminado el esparcimiento de la capa de cemento asfáltico y antes de proceder a la compactación, deberá comprobarse la superficie y corregirse cualquier desigualdad que aparezca, agregando o quitando material con rastrillos. En los lugares inaccesibles a la máquina terminadora, el trabajo podrá ejecutarse a mano, descargando la mezcla sobre una plancha de acero situada fuera del lugar a extenderse la misma, y desde ella se esparcirá con palas y rastrillos calientes, en una capa uniforme, suelta y con el espesor debido. Las mezclas no se descargarán más rápidamente de lo que puedan distribuir los paleros, ni estos podrán distribuir más rápidamente de lo que puedan espaciar los rastrilleros, los mismos que no podrán estar sobre la mezcla, salvo cuando estén corrigiendo defectos del primer rastrillado, en cuyo caso estarán equipados con calzados adecuados.

2.16.3.2. Juntas

Las juntas longitudinales y transversales deberán hacerse de manera cuidadosa, debiendo ser bien unidas y selladas. Las juntas entre pavimentos recientes y otros más antiguos, o entre sucesivos días de trabajo, se deben hacer de tal forma que se asegure una unión y pegas continuas entre el viejo y nuevo pavimento. El borde de la carpeta anterior, se debe cortar en todo su espesor, de modo que quede una superficie completamente nueva, después de lo cual la nueva mezcla que se coloque en contacto

con ella deberá cubrir el espesor completo. Antes de proceder al colocado de la nueva mezcla contra las superficies de contacto de juntas longitudinales, brocales, cunetas, colectores, bocas de visitas, etc. se pintará con una capa delgada y uniforme de cemento asfáltico caliente o disuelto en gasolina.

2.16.3.3. Compactación

Después de extender la mezcla, estará completa y uniformemente compactada con aplanadoras Tandem de 10 a 12 toneladas, tan pronto como la mezcla aguante el aplanado sin desplazamiento indebido, no tolerándose dilataciones en el mismo.

En el caso en que se cuente con vibrador, este comenzará longitudinalmente en los bordes y procederá y procederá hacia el eje del pavimento, excepto en las curvas peraltadas, que procederá del borde inferior al superior, traslapando en sucesivos viajes por lo menos una mitad del ancho de la rueda trasera.

Se realizarán viajes alternados de la aplanadora, con longitudes ligeramente diferentes.

La velocidad de la aplanadora no excederá de 5Km./Hora, y en todo momento será suficientemente lenta para evitar el desplazamiento de la mezcla caliente y cualquier desplazamiento que ocurra cuando cambie la aplanadora de dirección, o por otra razón debe ser corregido usando rastrillos y nueva mezcla donde y cuando se necesite. El aplanado se realizará hasta que todas las marcas de la aplanadora desaparezcan y no sea posible conseguir mayor compactación. En los lugares inaccesibles a la aplanadora, se debe realizar la compactación completa por medio de pisones calientes y tomando en cuenta los procedimientos que se siguen para realizar y compactar las juntas.

Cuando se realice la compactación, la mezcla deberá tener una temperatura de 90° y 100°C.

2.16.3.4. Requisitos de la carpeta terminada

La carpeta después de la compactación final cumplirá con los siguientes requisitos:

- Estará conforme con el trazado, rasante y sección tipo de planos.
- El espesor especificado en ningún punto variará en más de 0.5 cm., cualquier lugar defectuoso será remplazado sacando la carpeta en dichos lugares y colocando nueva mezcla caliente y se compactará adecuadamente.

- La superficie estará libre de depresiones que excederán de 0.3 cm. cuando se mida con una regla recta de 3m. paralela al eje de la carretera.
- Después de la última compactación las muestras del pavimento tendrán una densidad mayor del 95% de la densidad de las muestras de mezclas compactadas en el laboratorio.
- No se permitirá ningún tránsito sobre la superficie terminada mientras no haya enfriado completamente.

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO Y

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO Y RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. Criterio del diseño metodológico

3.1.1. Unidad de estudio o muestra

La unidad a estudiar para el presente trabajo será el racapamiento con carpeta delgada tramo vial Cruce Alto Senac – San Andrés.

3.1.2. Población

La población se considera todo el tramo Cruce Alto Senac – San Andrés.

3.1.3. Muestra

Nuestra muestra es el tramo en estudio Cruce Alto Senac – San Andrés de la progresiva 0+000 a la progresiva 12+200.

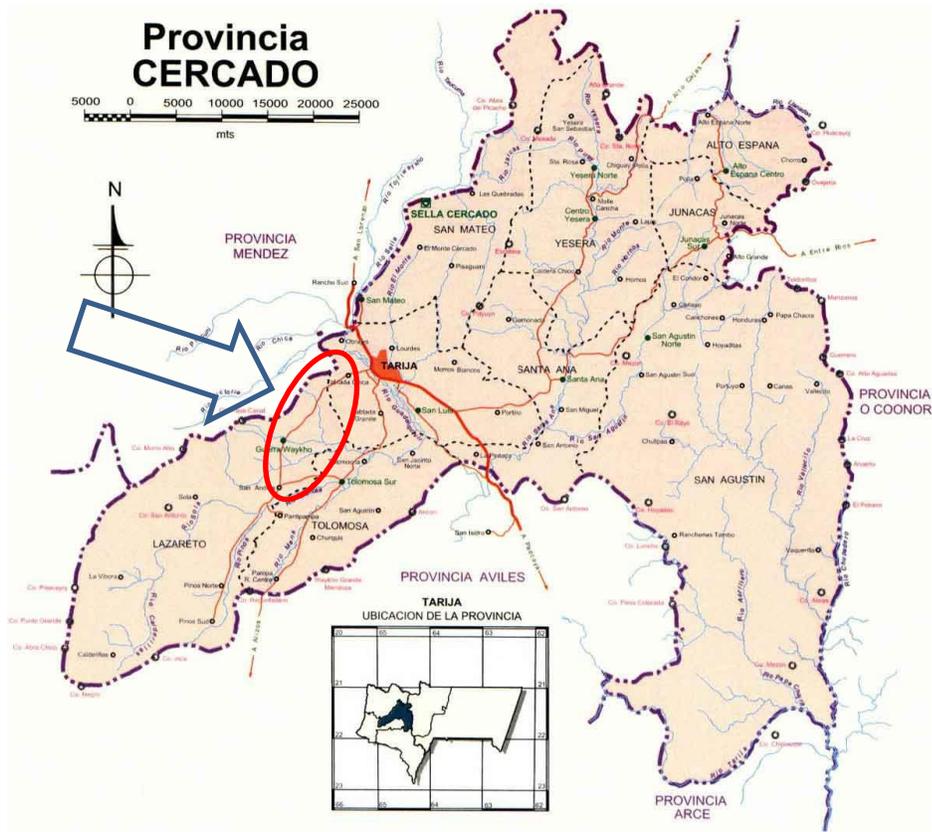
3.1.4. Tamaño de la muestra

Progresiva 0+000 a la progresiva 12+200

3.2. Localización

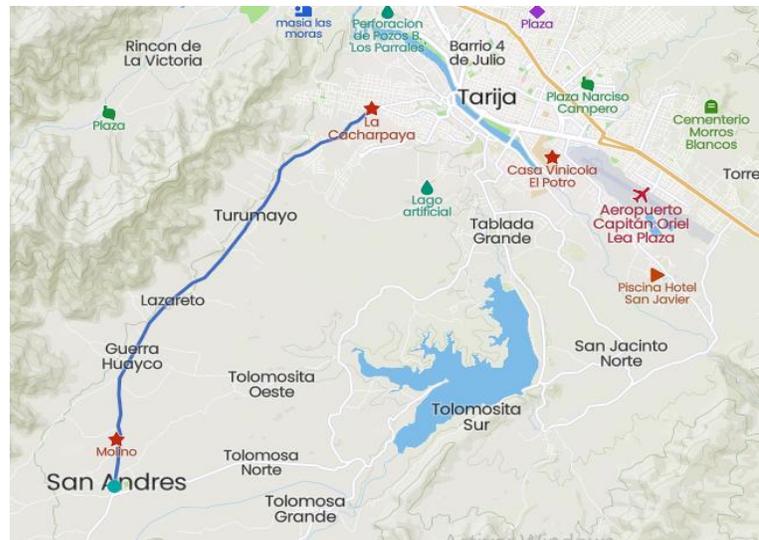
El tramo “Cruce Alto Senac – San Andrés” se encuentra ubicado en el cantón de la Sub Central Lazareto área rural de la provincia cercado del departamento de Tarija, al sur de Bolivia, es el principal acceso hacia las comunidades beneficiarias de esta carretera, la longitud del tramo es aproximadamente de 12.2 km.

Figura 14. Ubicación geográfica de la zona en estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Coordenadas de la ubicación del tramo en estudio.



Fuente: Google Maps.

Cruce Alto Senac:

Latitud: 21°32'14,10"S

Longitud: 64°45'38,25"O

Altitud: 1936 m.s.n.m.

Comunidad San Andrés:

Latitud: 21°37'30,33"S

Longitud: 64°49'6,79"O

Altitud: 1984 m.s.n.m.m.

La altura media del tramo es de 1960 m.s.n.m.

En coordenadas UTM se encuentra en:**Cruce Alto Senac:**

E:317662,97

S: 7617363,58

Zona 20K

San Andrés:

E:311775,28

S:7607568,35

Zona 20K

3.3. Características del tramo en estudio

Para el diseño de la vía del tramo, se tuvieron en cuenta como base las recomendaciones del Manual de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras del Servicio Nacional de Caminos, obteniéndose parámetros de diseño adecuados al análisis efectuado sobre las características topográficas, la velocidad, seguridad en la operación vehicular, etc. Adicionalmente se tomaron conceptos específicos de las normal AASTHO.

El tramo “Cruce Alto Senac – San Andrés” llega a ser concluida el 2006 y el tramo de inicio se encuentra en las afueras de la ciudad de Tarija a 5,63 km de distancia del kilómetro cero de la urbe Tarijeña. Según la Dirección de Administración Vial (DAV) se tiene la siguiente descripción técnica del tramo:

Diseño geométrico:

Longitud total:	9,50m
-----------------	-------

Pendiente máxima:	6,00%
-------------------	-------

Pendiente transversal:	2,50%
------------------------	-------

Topografía:	Ondulada
Categoría de carretera:	Clase IV-A
Velocidad directriz:	40,00km/hr
Ancho de carril:	3,65m
Ancho de calzada:	7,30m
Ancho de bermas (Tarija – San Andrés):	0,50m
Ancho de plataforma (Tarija – San Andrés):	8,30m
Radio de curvatura mínimo:	40,00m

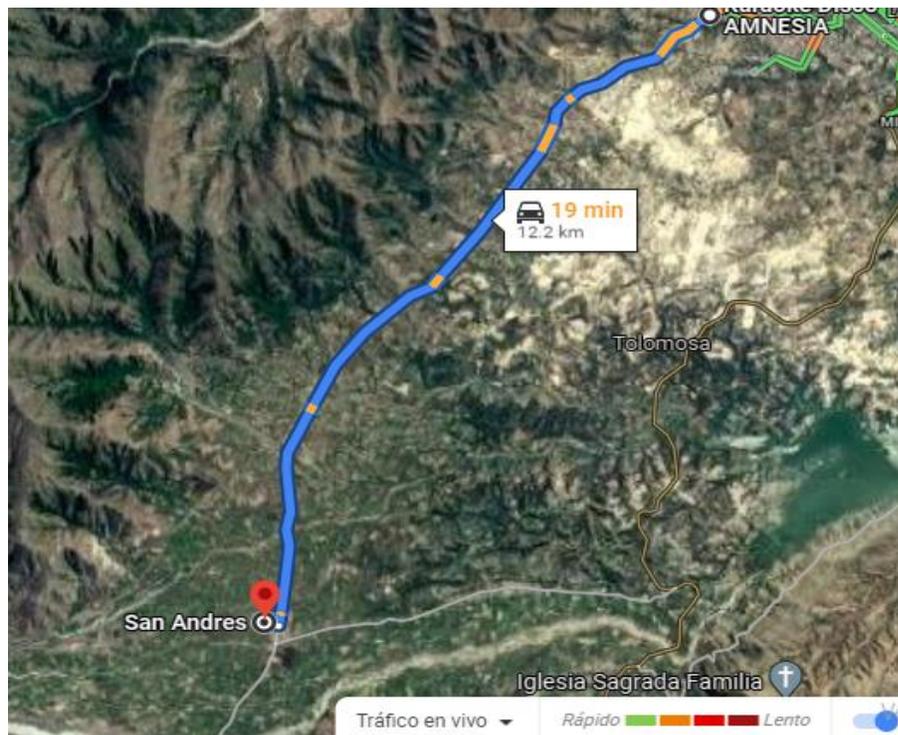
Paquete estructural

Sub rasante mejorada	20,00cm
Sub base	20,00cm
Capa base	15,00cm
Capa de rodadura	TST

Drenaje y obras complementarias

Cunetas revestidas	
Construcción de muros de H°C°	
Construcción de alcantarillas cajón	
Construcción de puentes (L= variable)	
Colocación de señalización vertical	
Señalización horizontal	

Figura 16. Longitud del tramo en estudio.



Fuente: Google Maps.

Tabla 13. Longitud del tramo vial en estudio.

TRAMO N°	DESCRIPCIÓN	INICIO (KM)	FINAL (KM)	LONGITUD (KM)
1	Cruce Alto Senac – San Andrés	0+000	12+200	12.2

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Evaluación superficial del tramo.

Para la evaluación superficial del tramo “Cruce Alto Senac – San Andrés” se evaluaron dos Parámetros; PCI (Índice de Condición del Pavimento), IFI (Índice de Fricción Internacional) y Círculo de Arena, lo cual se detalla de mejor manera en los puntos posteriores.

3.4.1. Aplicación del método PCI (Índice de condición del pavimento)

3.4.1.1. Muestreo y unidades de muestra

Las áreas de muestreo según el método PCI del cuerpo de la armada de los Estados Unidos deben tener una superficie comprendida entre el rango de $230 \pm 93 \text{ m}^2$, como

se observa en la tabla 14, que presenta relaciones de longitud – ancho de calzada pavimentada.

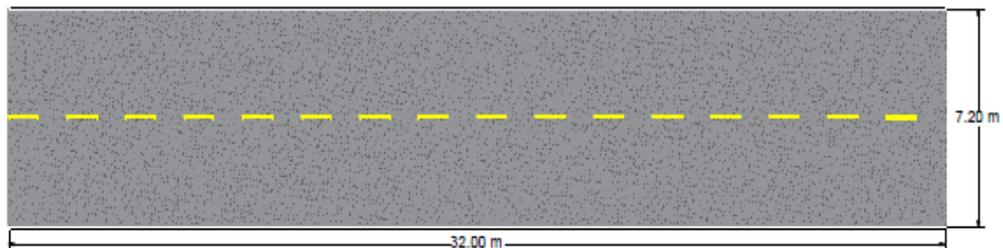
Tabla 14. Longitudes de Unidades de Muestreo Asfálticas.

Ancho de calzada (m)	Longitud de unidad de muestreo (m)
5.00	46.00
5.50	41.80
6.00	38.30
6.50	35.40
7.30 (máx.)	31.50

Fuente: (Olivera Bustamante, 2009)

En función a las medidas tomadas del ancho de calzada del pavimento en el tramo “Cruce Alto Senac – San Andrés” es de 7.3 m, debido a esto se adoptó una longitud de 32 m. para cada una de las áreas.

Figura 17. Unidad de muestreo para el método PCI A = 230.40 m²



Fuente: Elaboración propia.

Consiguiendo de esta manera un área de 230.40 m² que está dentro del rango establecido por el método PCI, con el fin de uniformizar las secciones de estudio se utilizara un área uniforme de 230.00 m². En base a la longitud del tramo de 12.2 km a evaluar, en base a las áreas de sección establecidas para la evaluación superficial, se inspecciono minuciosamente todo el tramo tanto de ida como también de vuelta, la primera unidad de muestra se inició a partir de la progresiva 0+000 y así sucesivamente, para tener la información de todo el tramo, se dividió el tramo en 5 secciones y cada sección tiene 62 unidades de muestreo de 230.40 m² excepto la sección 5 que se hicieron 38 unidades de 230.40 m².

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 los últimos tres kilómetros que serían para completar los 12200 m se hicieron lecturas adicionales por que esta última parte del tramo se encuentra en mejores condiciones que los primeros 9 km del tramo de Cruce Alto Senac – San Andrés para así poder evaluar la parte más crítica del tramo. Todas las unidades de muestra de la sección pueden ser inspeccionadas para determinar el valor del PCI promedio de la sección. Este tipo de análisis es ideal para una mejor estimación para realizar el recapamiento de la vía.

3.4.1.2. Procedimiento de evaluación del índice de condición del pavimento (PCI)

Se inspecciono cuidadosamente cada una de las unidades de muestra identificadas en el tramo carretero, para medir el tipo, cantidad y severidad de las fallas de acuerdo con el manual de daños del método PCI, se debe 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.

Tabla 15. Planilla de recolección de datos para el PCI.

METODO PCI				ESQUEMA			
INDICE DE CONDICION DEL PAVIMENTO EN VÍAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE							
HOJA DE REGISTRO							
Nombre de la vía:		Cruce Alto Senac - San Andrés		Sección:		1	
Ejecutor:		Rodrigo Eduardo Vega Yuca		Fecha:		21/10/2021	
				Unidad de muestra:		U4	
				Área:		230,4	
1. Piel de cocodrilo	6. Depresión	11. Parches y parches de cortes utilitarios	16. Fisura parabólica o por deslizamiento				
2. Exudación	7. Fisura de borde	12. Agregado pulido	17. Hinchamiento				
3. Fisuras en bloque	8. Fisura de reflexión de junta	13. Baches	18. Peladura por intemperismo y desprendimiento de agregados				
4. Abultamientos y hundimientos	9. Desnivel carril-berma	14. Ahuellamiento					
5. Corrugación	10. Fisuras longitudinales y transversales	15. Desplazamiento					
FALLA	CANTIDAD				TOTAL	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Tipo de fallas de pavimentos

Fallas	Unidad de medida	Fallas	Unidad de medida
1.-Piel de cocodrilo	m ²	14.-Ahuellamiento	m
2.-Exudación	m ²	15.-Desplazamiento	m ²
3.-Fisuras en bloque	m ²	16.-Fisura parabólica o por deslizamiento	m ²
4.-Elevación-Hundimiento	m ²	17.-Hinchamiento	N#
5.-Corrugaciones	m ²	18. Peladura por intemperismo y desprendimiento de agregados	m ²
6.-Depresiones	m ²		m ²
7.-Fisuras de borde	m	20.-Deformación por empuje	m ²
8.-Fisuras de reflexión de juntas	m	21.-Deslizamiento	m ²
9.-Desnivel Carril-Berma	m	22.-Hinchamiento	m ²
10.-Fisuras longitudinales y transversales	m ²	23.-Disgregación-Desintegración	m ²
11.-Parches y parches de cortes utilitarios	m ²	24.-Odulacion	m ²
12.-Agregado pulido	m ²	25.-Hundimiento	m ²
13.-Baches	m ²	26.-Surcos	m ²

Fuente: Elaboración propia.

Se registró la información en el formato adoptado, para tal fin tuve que conocer y seguir estrictamente las definiciones y procedimientos de medida para determinar el tipo de falla.

Figura 18. Procedimiento en la evaluación PCI.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 19 se ilustra el modelo de la planilla donde se procesó los datos tomados en campo.

Figura 19. Planilla de muestreo de datos Método PCI

VALORES DEDUCIDOS DE FALLAS EXISTENTES						
Falla	Unidad	TOTAL	Densidad %	VD	VDT	q
10L	m2	47,51	20,62	12	76,3	7
10M	m2	55,40	24,05	29		
13L	m2	4,00	1,74	27		
18L	m2	6,10	2,65	0,3		
15L	m2	3,20	1,39	8		

valor deducido mayor "HDV"= 29,00
 valor deducido mínimo= 0,30
 número máximo de valores admisibles "m"= 7,5 Fraccion= 0,5
 último valor de tabla= 0,2

CALCULO DEL PCI										
VALORES DEDUCIDOS					CDT	Q	CDV			
29	27	12	8	0,3	76,3	5	38			
29	27	12	8	2	78	4	43			
29	27	12	2	2	72	3	46			
29	27	2	2	2	62	2	45			
29	2	2	2	2	37	1	37			

Rango	Clasificación	Simbología
100 - 85	Bueno	
85 - 70	Satisfactorio	
70 - 55	Regular	
55 - 40	Pobre	
40 - 25	Muy Malo	
40 - 10	Grave	
10 - 0	Fallado	

PCI

HDV	46
PCI	54
CLASIFICACIÓN	
POBRE	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Aplicación del método IFI (Índice de Fricción Internacional)

3.4.2.1. Péndulo británico método para determinar el coeficiente de resistencia al deslizamiento en el pavimento

El Péndulo Británico es un péndulo dinámico que se utiliza para medir la energía perdida cuando el borde de un patín de goma se desliza sobre una superficie.

La medición de la fricción por medio del péndulo inglés tiene por objetivo obtener un Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (C.D.R.), manteniendo una correlación con el coeficiente físico de rozamiento, valora las características antideslizantes de la superficie de un pavimento; este valor es obtenido con la siguiente formula:

$$C.D.R. = \frac{\textit{lectura efectiva}}{100}$$

Figura 20. Péndulo de fricción británico



Fuente: Elaboración propia.

Este ensayo consiste en medir la pérdida de energía de un péndulo de características conocidas provisto en su extremo de una zapata de goma, cuando la arista de la zapata roza, con una presión determinada sobre la superficie a ensayar y en una longitud fija. Esta pérdida de energía se mide por el ángulo suplementario de la oscilación del péndulo.

3.4.2.2. Procedimiento de medición

Los ensayos de El Péndulo como así también del Círculo De Arena, se tomó en cuenta tanto el carril de ida como también el carril de vuelta, para lo cual se procedió de la siguiente manera:

Ensayo de Péndulo Británico.- Se realizó la toma de datos en las planillas con sus respectivas progresivas para poderlas identificar y realizar el ensayo del péndulo, los materiales utilizados para realizar el ensayo son los siguientes; Péndulo Británico, Termómetro, Envase de agua, brocha y una regla calibrada, seguidamente nos trasladamos al lugar del tramo en estudio, para dar inicio con el ensamblaje del equipo, una vez concluido se procedió a nivelar el equipo con las manivelas de tal forma que

la burbuja del ojo de pollo quede completamente centrada, se dio inicio con el ensayo se verifico que la punta de caucho del brazo del péndulo al realizar el balanceo realice el roce con la superficie asfáltica solamente dentro del rango de la regla calibrada que trae consigo el equipo, antes de realizar el ensayo se tuvo que limpiar la superficie del pavimento ensayar con una brocha limpiando toda impureza o polvo que presenta el pavimento debido al tráfico una vez limpia la superficie se dio inicio a asegurar el brazo del péndulo y soltarlo de tal forma que una vez que la aguja de medición no vuelva a descender en la medida marcada se sujeta el brazo en el ínterin de su regreso, posteriormente se anota en la planilla como primer dato se hizo cinco repeticiones en la superficie, se verifico la temperatura del pavimento al momento de realizar el ensayo, de esta manera se concluye para posteriormente pasar a realizar el mismo procedimiento en otro punto. (Ver figura 21)

Figura 21. Procedimiento de ensayo del péndulo británico.



Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.3. Cálculos desarrollados péndulo de fricción británico

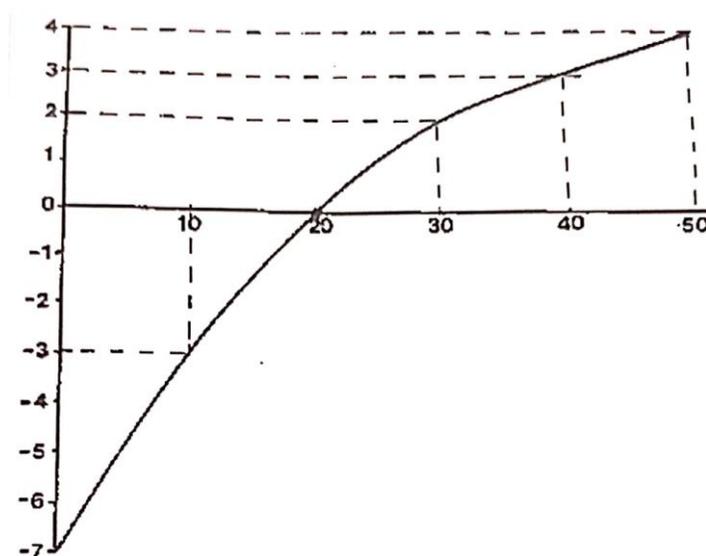
El coeficiente de resistencia al deslizamiento es obtenido de la siguiente manera:

$$C.D.R. = \frac{\text{lectura efectiva}}{100}$$

Las medidas efectuadas sobre el pavimento están siempre afectadas por las variaciones de temperatura de la zapata y de la superficie ensayada; es por esto, que al valor obtenido del péndulo se le adiciona un factor (Figura N° 34) a la lectura efectiva. Por ejemplo, si obtenemos una lectura de promedio 78 y tenemos una temperatura de 30°C, le adicionaremos a 78 el factor de 2 y tendremos 80.

Los resultados de las medidas efectuadas en cada zona de ensayo de un tramo de calzada serán expresados por, al menos, tres valores, correspondientes cada uno, a roderas y centro de la calzada. Cada uno de los tres valores o más valores obtenidos será la media aritmética de todas las lecturas efectuadas sobre los puntos de ensayo situados en las superficies consideradas y en todas las secciones transversales de cada tramo.

Figura 22. Corrección de resistencia al deslizamiento a distintas temperaturas.



Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales-Asfaltos ABC

3.4.2.4. Rangos de fricción

Después de diversas mediciones realizadas en distintos tipos de superficies, nace la siguiente sugerencia, la cual puede estar sujeta a cambios, según se incrementa la experiencia. Para valores de fricción con péndulo británico en pavimento mojado (condición crítica) es propuesto lo siguiente:

Tabla 17. Consideraciones para la aplicación del índice de fricción

Fricción, Valor de CDR, adimensional	Calificación
< 0,5	Malo (derrapamiento del vehículo)
0,51 - 0,6	De regular a bueno
0,61 - 0,8	Bueno
0,81 - 0,9	De bueno a regular
> 0,91	Malo (desgaste de neumáticos)

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales-Asfaltos ABC

3.4.3. Ensayo con círculo de arena

3.4.3.1. Círculo de arena, método para determinar la textura superficial del pavimento

El ensayo del círculo de arena, describe el procedimiento para determinar la profundidad de la macrotextura de la superficie del pavimento mediante la aplicación de un volumen conocido de material y la subsecuente medición del área total cubierta por este.

El método esta solo pensado para obtener un valor promedio de la profundidad de textura y no se considera sensible a la microtextura de la superficie del pavimento.

Los pavimentos con importante nivel de textura superficial permitirán un contacto más eficiente (en termino de área de contacto) entre neumático y pavimento. Este método es adecuado en ensayos in situ para determinar el promedio de profundidad de macrotextura de una superficie de pavimento.

El conocimiento de la profundidad de macrotextura del pavimento sirve como herramienta para caracterizar la textura de la superficie. Cuando es utilizado en conjunto con otros ensayos, los valores de profundidad de macrotextura derivados de este método puede ser utilizados para determinar las capacidades de resistencia al

deslizamiento del pavimento y lo adecuado de los materiales o técnicas de acabado utilizadas.

Cuando es utilizado con otros ensayos, se debe tener cuidado que todos los ensayos son aplicados en el mismo lugar. Producto del uso de la información obtenida mediante este método pueden resultar mejoramientos a las prácticas de acabado y mantenimiento.

Las mediciones de profundidad de textura obtenidas utilizando este método están influenciadas por las características de macrotextura del pavimento y no significativamente afectadas por la microtextura. La forma, tamaño y distribución de los áridos de la capa de rodadura son cualidades no abordadas por este método.

La superficie de pavimento a medir mediante este método debe estar seca y libre de suciedad o material suelto que, bajo tránsito normal, será removido.

3.4.3.2. Equipos y materiales empleados para el desarrollo del ensayo

Los elementos esenciales para la realización del ensayo consisten en los siguientes materiales y equipos.

- Arena normalizada, lavada, limpia, secada y tamizada.
- Cilindro contenedor de material, con un volumen interno predeterminado de al menos 25.000 mm^3 , para determinar el volumen de material esparcido.
- Disco para esparcir el material, plano y rígido, de 25 mm de espesor y 60 a 75 mm de diámetro. La parte inferior del disco se cubrió con una goma lisa y su parte superior con una manilla que facilito su agarre.
- Escobillas, una de cerdas duras y otra de cerdas blandas, que fueron utilizadas para limpiar la superficie de ensayo.
- Caja protectora de viento, pantalla adecuada que evita las turbulencias de viento ocasionadas por el tránsito durante el ensayo.
- Regla, de al menos 300 mm de longitud con subdivisiones al milímetro.
- Balanza con precisión a 0,1 gramos para asegurarse que el material utilizado en ensayo es igual en masa y volumen.

3.4.3.3. Calibración del equipo

En este equipo se requiere especial cuidado con la limpieza de la arena y con los elementos graduados antes descritos a fin de no alterar las mediciones obtenidas. Por lo tanto, la calibración en este caso está referida al cumplimiento estricto de las graduaciones tanto de arena y de recipientes como los elementos de medición que intervienen en el desarrollo del ensayo.

3.4.3.4. Procedimiento en campo

- **Área de muestra:** Se inspeccionó la superficie del pavimento a ser evaluada y se seleccionó un área seca y homogénea que no tenga singularidades tales como grietas o juntas.

Se procedió a limpiar completamente la superficie utilizando las escobillas para remover todos los residuos o material suelto en la superficie y finalmente se colocó la caja protectora para viento alrededor del área de estudio.

- **Material de muestra:** Para este ensayo se procedió a realizar el círculo de arena con un volumen de 25 cm^3 que determinamos con la ayuda de una balanza de laboratorio, se determinó la masa del material dentro del cilindro y se utilizó esta misma cantidad en cada uno de los ensayos a lo largo del tramo.
- **Medidas del ensayo:** Se vació el volumen o masa de material sobre la superficie limpia dentro del área protegida al viento. Cuidadosamente se esparció el material en forma circular con el disco plano, utilizando su lado de goma para estos efectos, llenando las cavidades de la superficie con las crestas de los áridos de la capa de rodadura.

Se midió y registro el diámetro del área cubierta por el material tomando cinco medidas igualmente espaciadas sobre el círculo. Se calculó y registro el promedio de las cinco medidas.

Figura 23. Procedimiento de ensayo del círculo de arena.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Equipos del para el ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

3.4.4. Evaluación estructural del tramo

3.4.4.1. Procedimiento de medición Viga Benkelman

Los ensayos para la evaluación estructural se realizaron en diferentes progresivas a lo largo del tramo carretero, el procedimiento es de la siguiente manera:

Se efectuó inicialmente la calibración de la viga Benkelman en el laboratorio de asfalto, para verificar que el equipo esté en condiciones óptimas para ser manejado, mediante esta calibración definir el valor de la constante (K) a ser utilizada para el cálculo de las deflexiones, donde se obtuvo la constante $k=2$.

La volqueta que se alquiló para la realización de los ensayos fue de 8.00 m³ de capacidad con eje trasero simple de llantas dobles, para realizar el ensayo se comunicó al chofer que realice la medición de la presión de inflado de las llantas de tal forma que registre 80 psi, posteriormente se pesó en el eje trasero de la volqueta para lograr el peso necesario que es mayor a (8.2 Tn) el peso de nuestra volqueta para la práctica llegó a pesar 10800 Kg, una vez localizados las unidades de muestreo se marcaron y efectuaron mediciones cada 200 m y en algunos puntos del tramo estas distancias variaron por las dificultades que se presentaban como ser subidas, curvas que significaban peligro para realizar el ensayo por el tráfico y la poca visión que tienen en estos puntos también cabe recalcar que en algunos puntos se realizó a más largas distancias porque el asfalto se encuentra más conservado en estos tramos y así poder acabar de realizar el ensayo en dos días.

Se definieron dos líneas de medición longitudinales al eje de la vía una en el carril de ida (Cruce Alto Senac – San Andrés) y otra en el carril de vuelta (San Andrés – Cruce Alto Senac) de 5 m, a una distancia de 0.60 a 0.90 m del borde de la carpeta, variando estas medidas en función a la ubicación del ensayo, en cada punto de ensayo en el formato adoptado se registraron lecturas a 0.25, 0.50, 0.75, 1, 2, 3 y 5 m, el procedimiento de ensayo se desarrolla de la siguiente manera; en primer lugar, se procedió a ensamblar la viga ya que se tiene un brazo desplegable de dos módulos los cuales van ensamblados con tornillos de ajuste, posteriormente se nivela el apoyo principal con una manivela para lograr que el puntero del brazo de la viga este en contacto mínimo con la superficie asfáltica, este procedimiento se realizó de igual

manera en los siguientes puntos definidos de estudio, las fotos que se incluyen a continuación ilustran en forma general el procedimiento de medición del ensayo. Como se puede observar, un extremo de la viga se colocó entre las ruedas traseras de la volqueta a usarse sobre el punto de manera tal que este coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de la llanta, dejando el otro extremo fijo sobre el pavimento, en cada punto de ensayo se registraron las temperaturas del pavimento, se repitieron las operaciones descritas a lo largo del tramo de estudio.

Figura 25. Pesado de volquete.

BALANZA "MENDOZA"		KM 7 S CARRETERA AL CHACO - CEL. 70218771-734 1178	
Tarija - Bolivia			
N°	14828	Ingreso	9/03/2021 11:25:34 AM
Fecha	19/03/2021	Salida	19/03/2021 11:30:43 AM
BRUTO:	- - 0		
TARA:	10.300		
NETO:	10.300		
		234.78	gg
Cliente/Comprador	RODRIGO E VEGA Y.	Monto Bs	25.0
Material	VOLQUETA CALIBRADA	Placa	1132 CPH
Chofer	WEYMAR GALEAN		
Vendedor	NUZZI		
Observación			
	<i>[Firma]</i>		<i>[Firma]</i>
	ENCARGADO BALANZA		CLIENTE

Fuente: Balanza "Mendoza".

Figura 26. Procedimiento del ensayo viga Benkelman.



Fuente: Elaboración propia.

3.5. Carpetas asfálticas delgadas

Se denominan a las combinaciones de agregados pétreos cuyas partículas están ligadas por algún tipo de asfalto que actúa como aglomerante.

En el caso de las carpetas asfálticas delgadas están formadas por una capa mezclada de material pétreo cementado con asfalto, que se coloca sobre la base para proporcionar una superficie de rodamiento de bajos espesores (≤ 4 Cm.), y tamaños máximos de agregados de 12 mm (1/2”), que nos permitan obtener en todo tiempo un tránsito fácil y cómodo de los vehículos.

Este tipo de mezclas asfálticas, deben cumplir las siguientes características:

- a) **Estabilidad:** Deben poseer capacidad para soportar las solicitaciones del tránsito (esfuerzos normales y tangenciales) sin sufrir deformaciones tales como ondulaciones y ahuellamientos.
- b) **Flexibilidad:** Deben poseer capacidad para adaptarse a las deformaciones elásticas que sufren las capas inferiores (base, sub-base) sin romperse ni fatigarse.
- c) **Durabilidad:** Deben conservar sus propiedades originales durante su vida de servicio, resistiendo la acción destructiva del tránsito y los agentes atmosféricos (agua aire).
- d) **Propiedades Antideslizantes:** Las mezclas asfálticas constitutivas de las capas de rodamiento no deben sobre compactarse con el tránsito a extremos de que aflore el asfalto a la superficie tornándola resbaladiza.
Tampoco los agregados pétreos que la integran deben ser susceptibles al pulimento por el efecto abrasivo del tránsito por lo que es importante la dureza y la calidad de los agregados.
- e) **Compactibilidad:** Deben ser trabajables a fin de que con la compactación alcancen las densidades de diseño y consecuentemente la estabilidad requerida.

3.5.1. Agregados para carpetas delgadas

Las Carpetas Asfálticas delgadas están formadas por mezclas de agregado–asfalto de bajos espesores (≤ 4 Cm.), para lo cual se tienen tamaños máximos de (1/2”) 12 mm, sin embargo no cualquier tipo de agregado pétreo puede emplearse en forma adecuada

para formar las carpetas de bajos espesores, de ahí la necesidad de conocer las características físicas de estos agregados si son o no aptos para este tipo de carpetas, para lo cual se debe emplear pruebas de laboratorio tales como peso volumétrico seco y suelto, granulometría, densidad, absorción, desgaste adherencia con el asfalto y otros. Seguidamente se tiene una normativa de los agregados a ser empleados en las carpetas asfálticas delgadas de acuerdo al siguiente cuadro:

Tabla 18. Requisitos áridos gruesos (ej. mezclas densas)

ENSAYO	NORMA	EXIGENCIA
Partículas Trituradas	IRAM 1851	Mínimo, 75% de sus partículas, con dos o más caras de fracturas, y el 25% restante por lo menos con una.
Índice de Lajas	IRAM 1687	< 25%
Coefficiente de Desgaste Los Ángeles	IRAM 1532	< 25%
Coefficiente de Pulimento Acelerado	IRAM 1543	> 0,4 (valor indicativo, puesto que en Argentina el estudio de los áridos disponibles está en desarrollo).
Durabilidad por ataque con sulfato de sodio	IRAM 1525	< 10%
Polvo Adherido	VN E 68 - 65	< 0,5%
Plasticidad	IRAM 10502	NO Plástico
Microdeval	IRAM 1762	Determinación Obligatoria
Relación Vía Seca-Vía Húmeda, de la fracción que pasa el Tamiz IRAM 0,075 mm. (N.º 200)	VN E 7 - 65	> 50% (*)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Requisitos áridos finos (ej. mezclas densas)

ENSAYO	NORMA	EXIGENCIA
Equivalente de Arena	IRAM 1682	> 50%
Plasticidad de la fracción que pasa el Tamiz IRAM 0,425 mm. (N.º 40)	IRAM 10502	No Plástico
Plasticidad de la fracción que pasa el Tamiz IRAM 0,075 mm. (N.º 200)	IRAM 10502	< 4%
Relación Vía Seca-Vía Húmeda, de la fracción que pasa el Tamiz IRAM 0,075 mm. (N.º 200)	VN E 7 - 65	> 50% (*)

Fuente: Elaboración propia.

Para Concretos Asfálticos Densos tamaño máximo de agregado 12mm. (CAC D 12 (1/2")) y semidensas, solo para estos dos tipos de mezclas, el contenido de arena natural será como máximo de 8 %.

Tabla 20. Requisitos filler aporte.

Pasa Tamiz IRAM 0.425 mm. (N.º 40)	100%
Pasa Tamiz IRAM 0,150 mm. (N.º 100) mínimo.	90%
Pasa Tamiz IRAM 0.075 mm. (N.º 200) mínimo.	75%

Fuente: Elaboración propia.

Para estos casos, la Densidad Aparente (D. Ap.) en Tolueno (NL T-176):

$$0,5 \text{ gr/cm}^3 < D. \text{ Ap.} < 0,8 \text{ gr/cm}^3.$$

Para el caso de Cal ó Cemento, se limita a 3% en el total de la mezcla.

Tomando en cuenta las especificaciones normadas de acuerdo a la CPA (Comisión Permanente del Asfalto), se tienen las siguientes granulometrías:

Tabla 21. Granulometría.

Tamices	CAC D 12	CAC S12	CAD D 12	MAC M 8	MAC M 10	MAC F 8	MAC F 10	SMA 12	SMA 10
19 (3/4")	100	100	100					100	100
12,5(1/2")	80-95	80-95	70-100		100		100	90-100	100
9,5(3/8")	72-87	71-86	50-80	100	75-97	100	75-97	MAX 60	90-100
4,75(N°4)	50-65	47-62	15-30	15-28	15-28	25-40	25-40	30-40	26-60
2,36(N°8)	35-50	30-45	10-22	15-25	12-25	20-35	20-35	20-27	20-28
(N°30)	18-30	15-25	6-13	9-18	9-18	12-25	12-25		
(N°50)	13-23	10-18							
(N°200)	5-8	4-8	3-6	5-8	5-8	7-10	7-10	9-13	9-13

Fuente: Elaboración propia.

CAC D12: Concreto Asfalto Convencional Denso con tamaño máximo de agregado 12 mm. (1/2")

CAC S12: Concreto Asfalto Convencional Semidenso con tamaño máximo de agregado 12 mm. (1/2")

CAD D12: Concreto Asfalto Drenante con tamaño máximo de agregado 12 mm. (1/2")

MAC M8 y MAC M10: Microconcretos Asfálticos de granulometría discontinua monogranulares de tamaños máximos de agregados de 8 mm. y 10 mm. Respectivamente (1,5 - 2.5 Cm).

MAC F8 y MAC F10: Microconcretos asfálticos de granulometría discontinua tamaño máximo de agregado de 8 mm. y 12 mm. Respectivamente (2.5 – 3.5 Cm.).

SMA 10 y SMA 12: Concretos asfálticos Tipo SMA.

De acuerdo a la selección del tipo de asfalto a ser empleado en el diseño y al espesor de la carpeta de rodadura, se determinan las granulometrías de acuerdo al cuadro especificado.

3.5.2. Cemento asfáltico para carpetas delgadas

Las carpetas asfálticas delgadas, se diseñarán mezclando en caliente el agregado con el asfalto, puesto a que esta mezcla es una de las más importantes en la tecnología vial. Los materiales bituminosos empleados para esta mezcla, son del tipo de Cemento asfáltico de penetración:

60 – 70, 85 – 100 ó 120-150 según el clima o el tráfico.

Una vez elegido el tipo de Cemento asfalto (C.A.) a utilizar, debe ser evaluado en laboratorio mediante los ensayos de calidad especificados y que fueron dados en asfaltos.

Las características de los ligantes asfálticos se deben escoger de acuerdo al clima en el cual se empleará el diseño, de manera que en el cuadro siguiente se tienen este tipo de requisitos.

Tabla 22. Requisitos sobre ligantes asfálticos (i)

Clima Cálido	A50-60 CA30, CA40 AM2, AM3	Los Asfaltos 50-60, 70-100 y 150/200, s/IRAM 6604(2002) Los Asfaltos CA5, CA10, CA30 y CA40, s/IRAM 6835 (2002) Los Asfaltos modificados AM2, AM3 y AM4, s/IRAM 6596 (200)
Clima Medio	A50-60 CA20, CA30 AM2, AM3	
Clima Templado	A50-60 A70-100 CA10, CA20, CA30 AM2, AM3	
Clima Frío	A70-100 150-200 CA5, CA10 AM3, AM4	

Fuente: Elaboración propia.

Nota. Tomando en cuenta la Tabla N° 22, se puede observar que el diseño de la carpeta delgada se realizara para el clima de Tarija – Cercado, en este caso el clima medio.

Tabla 23. Requisitos de dosificación D, S, CAD y Micros.

		Mezclas D, S	Mezclas MAC F
Ensayo Marshall	N.º Golpes por cara	75	50
	Estabilidad (kN)	>9	>7,5
	Vacíos en Mezcla (%)	3 - 5	4 - 7
	Relación E/F	2500 - 4000	---
	VAM (%)	>=15	---
Comprobación a las deformaciones permanentes	En el MD el pliego particular, la autoridad de aplicación y/o el director de las obras, definirá las condiciones de realización, así como los parámetros a cumplir para este ensayo		
Resist. Conservada (%) Tracción indirecta	>75	>75	
% de árido fino no triturado en mezcla	<8	0	
% Mínimo al recomendado	1	1	
Contenido mínimo de ligante (Total % en masa sobre mezcla)	MF>5.2%		
Relac. F/A Recomend.	MF<1.6		

Fuente: Elaboración propia.

Para definir los tipos de asfaltos que se emplearan para el diseño de la carpeta delgada, se muestra en la siguiente tabla algunos de ellos de acuerdo a las normas establecidas AASHTO y ASTM.

Tabla 24. Tipos de cementos asalticos

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ENSAYO		GRADOS									
	AASHTO	ASTM	40 - 50		60 - 70		85 - 100		120 - 150		200 300	
			MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
Penetración 25°C - 100gr - 5 seg												300
Viscosidad a 135°C	T-49	D-5	40	50	60	70	85	100	120	150	200	
Saybolt Furol S.S.F mínimo	T-72	E-102	120	-	100	-	85	-	70	-	50	-
Cinemática Centiastokes Mínimo	T-201	D-2170	240	-	200	-	175	-	140	-	100	-
Punto de inflamación (vaso abierto Cleveland) °C mínimo	T-48	D-92	232	-	232	-	232	-	232	-	177	-
Ensayo en horno película delgada	T-179	D-1754	232	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perdida por calentamiento %	-	-	-	0.8	-	0.8	-	1	-	1.3	-	1.5
Penetración después del ensayo 25°C. 100gr - 5 seg. Mínimo de la original	T-49	D-5	58	-	54	-	50	-	46	-	40	-
Ductilidad del residuo a 25°C	-	-	-	-	50	-	75	-	100	-	100	-
Ductilidad a 25°C mínimo	T-51	D-113	100	-	100	-	100	-	100	-	-	-
Solubilidad tricloroetileno	T-44	D-2042	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-
Ensayo de la Mancha	T-102	-	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Equivalente Heptano-Xeno % máx*	-	-	-	20**	-	20	-		-	20	-	20

Fuente: 5903 - 2A Manual de Carreteras MOP.

*Este porcentaje fue fijado por el laboratorio Nacional de Viscosidad.

En los Sitios donde la rapidez de curado es menor, se aconseja cambiar de MC a RC o de SC a MC. Para climas muy Calurosos, se recomienda usar el grado más pesado que sigue.

*Publicaciones del Instituto del Asfalto donde se encuentran especificaciones o información adicional.

Los tipos de asfaltos de acuerdo a su penetración, se determinan su utilidad de la siguiente manera:

Tabla 26. Penetración recomendable para diferentes tipos de asfaltos

PAVIMENTACIÓN	CLIMA			
	Cálido árido	Cálido húmedo	Moderado	Frio
Aeropuertos:				
Pistas de despegue	60 - 70	60 - 70	60 - 70	85 - 100
Caminos auxiliares	60 - 70	60 - 70	60 - 70	85 - 100
Aparcamientos	60 - 70	60 - 70	60 - 30	85 - 100
Carreteras:				
Tráfico pesado y muy pesado	60 - 70	60 - 70	60 - 70	85 - 100
Trafico medio a ligero	85 - 100	85 - 100	85 - 100	120 - 150
Calles:				
Tráfico pesado y muy pesado	60 - 70	60 - 70	60 - 70	85 - 100*
Trafico medio a ligero	85 - 100	85 - 100	85 - 100	85 - 100
Caminos particulares:				
Industriales	60 - 70	60 - 70	60 - 70	85 - 100
Estaciones de servicio	60 - 70	60 - 70	60 - 70	85 - 100
Residenciales	60 - 70	60 - 70	85 - 100	85 - 100
Aparcamientos:				
Industriales	60 - 70	60 - 70	60 - 70	60 - 70
Comerciales	60 - 70	60 - 70	60 - 70	85 - 100
Zonas de recreo:				
Pistas de tenis	85 - 100	85 - 100	85 - 100	85 - 100
Terrenos de juego	85 - 100	85 - 100	85 - 100	85 - 100
Bordillos	60 - 70	60 - 70	60 - 70	85 - 100

* Normalmente se emplea en el sheet asphalt, asfalto de penetración 60 - 70

Fuente: 5904,1 -(a) Manual de Carreteras MOP

3.5.3. Diseño de mezclas para carpetas delgadas

El diseño de una mezcla asfáltica en caliente, comprende fundamentalmente:

- a) Establecer los criterios de diseño en función al uso a que se lo destine, tal como base o capa de rodadura y al tráfico a que estará sometida sea este liviano, mediano o pesado. Sobre la base de ello se deben fijar las características que debe cumplir la mezcla en cuanto a estabilidad, fluencia y porcentaje de vacíos. La tabla adjunta da las especificaciones Marshall de una mezcla asfáltica diseñada y evaluada por este método.
- b) Efectuar el dosaje de la mezcla que consiste en la determinación de los porcentajes de los componentes de la mezcla, de manera tal que esta cumpla los requisitos de calidad preestablecidos.

3.5.3.1. Componentes de la mezcla

Una mezcla asfáltica en caliente está constituida por los siguientes componentes:

- a) Agregado grueso (pasa 1 ½", 1", ¾", ó ½" y retiene el tamiz N°8), debe ser obtenido por trituración y el tamaño máximo no debe ser superior a 1/3 del espesor que tendrá la capa asfáltica.
- b) Agregado fino (pasa tamiz N°8 retiene Tamiz N°200).
- c) Filler o relleno mineral: pasa 100% Tamiz N°100 y no menos de 70% por el Tamiz N°200.
- d) Cemento asfáltico de penetración 60-70, 85-100 ó 120-150 según el clima y el tráfico.

3.5.3.2. Requisitos de calidad de los materiales

- a) **Agregado Grueso.** - Es muy importante la determinación del tamaño máximo del agregado, porque este es el que determina la mayor o menor suavidad de la capa de rodadura en función de la menor o mayor dimensión del tamaño máximo. Las características técnicas de los agregados deben cumplir con lo señalado anteriormente ya sea forma de las partículas, desgaste, durabilidad, resistencia, forma de las partículas, limpieza, afinidad con el asfalto, etc.

- b) Agregado Fino.** - Debe ser limpio y constituido por partículas resistentes. Sometiendo al ensayo de equivalente de arena debe acusar valores superiores al 50%. Según las exigencias fijadas para la mezcla puede usarse únicamente arena natural o está más una arena de trituración. La incorporación de la arena de trituración, puede incrementar la estabilidad de la mezcla, pero reduce la trabajabilidad por lo que su incorporación debe ser adecuadamente estudiada y evaluada.
- c) Filler o relleno mineral:** Este debe ser preferentemente de naturaleza calcárea a fin de que tenga afinidad por el asfalto por lo que se usa como tal corrientemente polvo calizo o cemento Portland.
- d) Cemento Asfáltico.** - Una vez elegido el cemento asfáltico a utilizar, debe ser evaluado en laboratorio mediante los ensayos de calidad especificados y que fueron dados en “asfaltos”.

3.5.3.3. Contenido mínimo de cemento asfáltico

Antes de desarrollar una mezcla asfáltica en laboratorio tiene que estar establecido el porcentaje de C.A., para ello se sigue el procedimiento que se indica en la determinación del contenido mínimo, para lo cual existen dos metodologías:

- Método del Área Superficial.
- Método de la Distribución de Agregados.

3.5.3.4. Contenido óptimo de cemento asfáltico

Para establecer el contenido óptimo de Cemento Asfáltico en una mezcla asfáltica, se realiza en base al Contenido Mínimo ya determinado, a partir del cual se realizan varios ensayos en laboratorio a fin de establecer el Contenido Óptimo, para ello se tienen varios métodos, pero solamente se tomarán en cuenta dos de los más importantes que son:

- Por medio de la prueba de Compresión Axial no Confinada.
- Por medio del Método Marshall.

3.5.4. Pruebas de control para carpetas delgadas

Cuando se realiza la dosificación de las carpetas delgadas, se deben tener en cuenta el control tecnológico de las mezclas realizando los siguientes controles:

3.5.4.1. Ensayos previos de los materiales

3.5.4.1.1 Agregado Grueso

- a) Análisis granulométrico.
- b) Peso específico BULK.
- c) Desgaste Los Ángeles.
- d) Durabilidad con Na_2SO_4 ó MgSO_4 .
- e) Forma de las partículas.

3.5.4.1.2 Agregado Fino

- a) Análisis granulométrico.
- b) Equivalente de arena.
- c) Peso específico BULK.
- d) Durabilidad con Na_2SO_4 ó MgSO_4 .

3.5.4.1.3 Filler

- a) Granulometría.
- b) Peso específico aparente.

3.5.4.1.4 Cemento Asfáltico

- a) Peso específico.
- b) Penetración y punto de ablandamiento.
- c) Viscosidad (Saybolt Furol o Cinematica).
- d) Ductilidad.
- e) Punto de Inflamación.

CAPÍTULO IV
EVALUACIÓN, DISEÑO Y ANÁLISIS

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN, DISEÑO Y ANÁLISIS

4.1. Procedimiento de Evaluación Superficial

4.1.1. Evaluación superficial por el método PCI

4.1.1.1. Procedimiento de Cálculo del PCI (Índice de Condición del Pavimento)

Para el cálculo del PCI debe seguirse el siguiente procedimiento: Debe 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 existente, ver la tabla 27.

Tabla 27. Fallas existentes.

VALORES DEDUCIDOS DE FALLAS EXISTENTES						
Falla	Unidad	TOTAL	Densidad %	VD	VDT	q
10L	m ²	47,51	20,62	12	76,3	7
10M	m ²	55,40	24,05	29		
13L	m ²	4,00	1,74	27		
18L	m ²	6,10	2,65	0,3		
15L	m ²	3,20	1,39	8		

Fuente: Elaboración propia.

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:

Cálculo de la densidad:

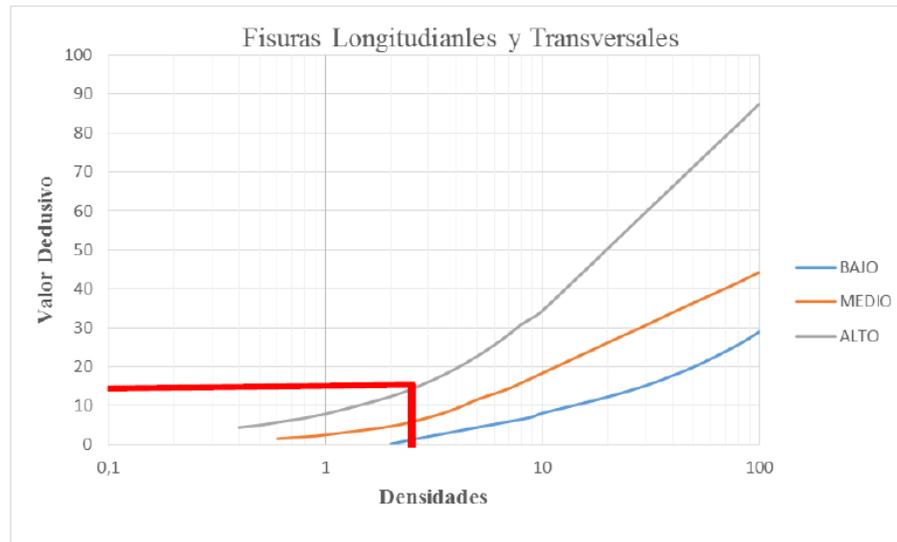
$$Densidad = \frac{\text{Área total de falla (tipo de severidad)}}{\text{Área de unidad de muestreo}} * 100$$

$$Densidad = \frac{47,51}{230,4} * 100$$

$$Densidad = 20,62 \%$$

Para calcular el “valor deducido” se determina mediante el uso de las curvas o tablas denominadas “valor deducido” de acuerdo con el tipo de falla. Figura 27.

Figura 27. Obtención del valor deducido (VD)



Fuente: Pavement condition index PCI (Shahin – Khon)

Determinar 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; otro modo, el máximo CDV debe ser determinado usando el procedimiento descrito en los siguientes puntos.

Crear una lista de valores deducidos individuales en orden descendentes. Por ejemplo, en la tabla 27 esta lista será 12,29,27,0.3 y 8

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.

(Por ejemplo, en la tabla 27, $m= 1+(9/98) (100-29) =7,50$).

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

Figura 28. Medición de las fallas superficiales



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Resultados de valor deducido corregido (CDV).

CALCULO DEL PCI									
VALORES DEDUCIDOS							CDT	Q	CDV
29	27	12	8	0,3			76,3	5	38
29	27	12	8	2			78	4	43
29	27	12	2	2			72	3	46
29	27	2	2	2			62	2	45
29	2	2	2	2			37	1	37

Fuente: Elaboración propia.

Determinar el máximo valor corregido (CDV) en forma iterativa como se muestra en la Tabla 28.

Determinar el valor deducido total (CDT) mediante la suma de los valores deducidos individuales. El valor deducido total que se obtiene de la suma en la Tabla 28 es 76.3.

Determinar “q” como el número de valores deducidos mayores a 2. Por ejemplo, en la tabla 28 $q=5$.

Determinar el valor de CDV a partir del valor deducido total (CDT) y del valor de “q” utilizando las curvas apropiadas de corrección para pavimentos flexibles.

Figura 29. Curvas de corrección del valor deducido para pavimentos asfálticos.



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

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

El máximo CDV es el mayor de todos los CDVs.

Calcular el PCI restándole a 100 el máximo CDV.

Se compara el estado de la sección según la tabla 29 siguiente.

El PCI de la sección será el promedio de todas las unidades de muestreo.

Tabla 29. Índice de condición del pavimento (PCI) y escala de graduación

Rango	Clasificación	Simbología
100 - 85	Bueno	
85 - 70	Satisfactorio	
70 - 55	Regular	
55 - 40	Malo	
40 - 25	Muy Malo	
40 - 10	Grave	
10 - 0	Fallado	

Fuente: Procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en caminos y estacionamientos ASTM D6433-11.

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

Para las progresivas 0+000 a 8+000

Ancho de vía = 7,30 m

Longitud de muestreo = 32 m

Longitud de sección = 2000 m

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

$$N = \frac{2000}{32} = 62.5 \Rightarrow N = 63$$

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

Donde:

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

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

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

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

Intervalo de muestreo (i)

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

Tabla 30. Muestras seleccionadas para el PCI prog. 0+000 – 8+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.

Para las progresiva 8+000 a 9+220

Ancho de vía = 7,30 m

Longitud de muestreo = 32 m

Longitud de sección = 1220 m

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

$$N = \frac{1220}{32} = 38,12 \Rightarrow N = 39$$

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

Donde:

N = 39 (Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento)

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

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

$$n = \frac{39 * 10^2}{\frac{5^2}{4} * (39 - 1) + 10^2} = 11,56 \Rightarrow 12 \text{ Unidades de muestra}$$

Intervalo de muestreo (i)

$$i = \frac{N}{n} = \frac{39}{12} = 3,25 \Rightarrow \text{Cada 3 unidades}$$

Tabla 31. Muestras seleccionadas para el PCI prog. 8+000 – 9+220

SECCIÓN 5		
Prog. inicial	Prog. final	Unidad de muestra
8+064	8+096	U3
8+160	8+192	U6
8+256	8+288	U9
8+352	8+384	U12
8+448	8+480	U15
8+544	8+576	U18
8+640	8+672	U21

8+736	8+768	U24
8+832	8+864	U27
8+928	8+960	U30
9+024	9+056	U33
9+120	9+152	U36

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Resultados y análisis de los resultados del PCI

4.1.2.1. Análisis de los resultados parciales

Tabla 32. Calificación 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	54,00	MALO
8	0+224	0+256	63,00	REGULAR
12	0+352	0+384	54,30	MALO
16	0+480	0+512	77,00	SATISFACTORIO
20	0+608	0+640	63,20	REGULAR
24	0+736	0+768	57,90	REGULAR
28	0+864	0+896	77,40	SATISFACTORIO
A1	0+900	0+944	38,00	MUY MALO
A2	0+944	0+988	30,00	MUY MALO
32	0+992	1+024	61,10	REGULAR
36	1+120	1+152	54,60	MALO
40	1+248	1+280	49,60	MALO
44	1+376	1+408	64,80	REGULAR
48	1+504	1+536	63,20	REGULAR
52	1+632	1+664	64,80	REGULAR
56	1+760	1+792	72,00	SATISFACTORIO
60	1+888	1+920	68,70	REGULAR
		PCIs=	59,17	REGULAR

Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. Frecuencia de calificación de la sección 1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Calificación 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	49,60	MALO
8	2+224	2+256	38,90	MUY MALO
12	2+352	2+384	61,10	REGULAR
A3	2+420	2+464	30,00	MUY MALO
16	2+480	2+512	65,60	REGULAR
20	2+608	2+640	63,90	REGULAR
24	2+736	2+768	70,50	SATISFACTORIO
28	2+864	2+896	32,70	MUY MALO
32	2+992	3+024	39,00	MUY MALO
36	3+120	3+152	57,20	REGULAR
40	3+248	3+280	74,10	SATISFACTORIO
44	3+376	3+408	84,50	SATISFACTORIO
48	3+504	3+536	98,00	BUENO
52	3+632	3+664	85,30	BUENO
56	3+760	3+792	84,60	SATISFACTORIO
60	3+888	3+920	57,30	REGULAR
		PCIs=	61,88	REGULAR

Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Frecuencia de calificación de la sección 2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. Calificación 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	30,00	MUY MALO
8	4+224	4+256	55,40	REGULAR
12	4+352	4+384	43,30	MALO
A4	4+410	4+454	14,00	GRAVE
16	4+480	4+512	43,90	MALO
20	4+608	4+640	58,70	REGULAR
24	4+736	4+768	28,10	MUY MALO
A5	4+780	4+824	29,00	MUY MALO
28	4+864	4+896	61,50	REGULAR
32	4+992	5+024	55,30	REGULAR
36	5+120	5+152	76,40	SATISFACTORIO
40	5+248	5+280	77,10	SATISFACTORIO
44	5+376	5+408	81,60	SATISFACTORIO
48	5+504	5+536	37,40	MUY MALO
A6	5+550	5+594	13,00	GRAVE
52	5+632	5+664	62,80	REGULAR
56	5+760	5+792	57,30	REGULAR
60	5+888	5+920	72,00	SATISFACTORIO
		PCIs=	54,74	MALO

Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Frecuencia de calificación de la sección 3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35. Calificación 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	81,70	SATISFACTORIO
8	6+224	6+256	36,70	MUY MALO
12	6+352	6+384	40,30	MALO
16	6+480	6+512	37,20	MUY MALO
20	6+608	6+640	35,20	MUY MALO
24	6+736	6+768	32,30	MUY MALO
A7	6+770	6+814	24,00	GRAVE
A8	6+814	6+858	32,00	MUY MALO
28	6+864	6+896	56,70	REGULAR
32	6+992	7+024	54,60	MALO
A9	7+030	7+074	31,00	MUY MALO
A10	7+074	7+118	30,00	MUY MALO
36	7+120	7+152	60,00	REGULAR
A11	7+154	7+198	29,00	MUY MALO
A12	7+198	7+242	31,00	MUY MALO
40	7+248	7+280	47,00	MALO
44	7+376	7+408	63,20	REGULAR
48	7+504	7+536	64,70	REGULAR
52	7+632	7+664	83,50	SATISFACTORIO
56	7+760	7+792	43,90	MALO
60	7+888	7+920	21,60	GRAVE
		PCIs=	42,14	MALO

Fuente: Elaboración propia.

Figura 33. Frecuencia de calificación de la sección 4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. Calificación PCI progresivas 8+000 a 9+220

SECCIÓN 5				
Unidad de muestreo	Progresiva inicial	Progresiva final	Valor del PCI	Calificación
3	8+064	8+096	84,50	SATISFACTORIO
6	8+160	8+192	70,50	SATISFACTORIO
9	8+256	8+288	39,50	MUY MALO
12	8+352	8+384	43,90	MALO
15	8+448	8+480	58,70	REGULAR
18	8+544	8+576	63,20	REGULAR
21	8+640	8+672	64,80	REGULAR
24	8+736	8+768	28,10	MUY MALO
A13	8+770	8+814	24,00	GRAVE
27	8+832	8+864	61,50	REGULAR
30	8+928	8+960	31,00	MUY MALO
33	9+024	9+056	47,60	MALO
36	9+120	9+152	50,40	MALO
A14	10+000	10+032	62,00	REGULAR
A15	11+000	11+032	58,00	REGULAR
A16	12+000	12+032	63,00	REGULAR
		PCIs=	53,01	MALO

Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Frecuencia de calificación de la sección 5

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.2. Análisis de los resultados por kilómetro de vía

Tabla 37. Calificación PCI por kilómetro de vía

ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO CON SUPERFICIE ASFÁLTICA			
RESULTADOS			
PROGRESIVAS		PCI	CALIFICACIÓN
0+000	1+000	57,59	REGULAR
1+000	2+000	62,53	REGULAR
2+000	3+000	50,14	MALO
3+000	4+000	77,29	SATISFACTORIO
4+000	5+000	41,92	MALO
5+000	6+000	59,70	REGULAR
6+000	7+000	43,07	MALO
7+000	8+000	45,90	MALO
8+000	9+220	53,17	MALO
9+220	10+000	62,00	REGULAR
10+000	11+000	58,00	REGULAR
11+000	12+200	63,00	REGULAR

Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. Frecuencia de calificación por kilómetro de vía



Fuente: Elaboración propia.

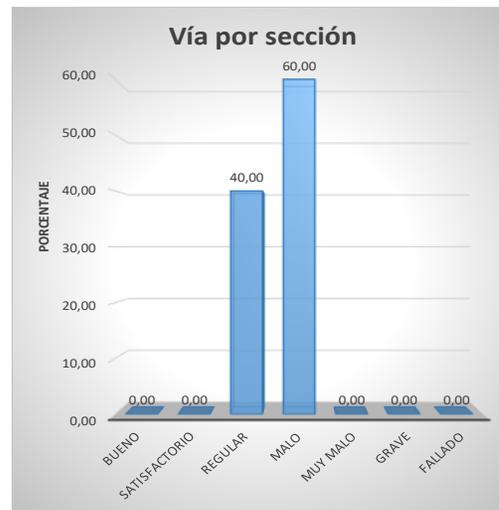
4.1.2.3. Análisis de los resultados por sección de vía

Tabla 38. Calificación PCI por secciones de vía

Índice de Condición del Pavimento			
resultados			
Progresivas		PCI	Calificación
0+000	2+000	59,17	REGULAR
2+000	4+000	61,88	REGULAR
4+000	6+000	54,74	MALO
6+000	8+000	42,14	MALO
8+000	12+200	53,01	MALO

Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. Frecuencia de calificación por sección de vía



Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.4. Resultado del PCI del tramo

Tabla 39. Calificación PCI del proyecto

ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO CON SUPERFICIE ASFÁLTICA			
RESULTADOS			
PROGRESIVAS		PCI	CALIFICACIÓN
0+000	12+200	54,19	MALO

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Evaluación superficial por el método IFI

4.1.3.1. Procedimiento de cálculo del IFI (Índice de fricción del Internacional)

Tabla 40. Datos de I.F.I. Carril: Derecho (ida y vuelta)

Prog.	T °C	Medidas de BPN con péndulo de fricción					Prom
Punto 1	29,00	45,00	46,00	50,00	63,00	47,00	50,20
Punto 2	29,00	55,00	54,00	59,00	46,00	68,00	56,40
Punto 3	29,00	47,00	43,00	38,00	42,00	53,00	44,60
Punto 4	30,00	72,00	89,00	73,00	71,00	80,00	77,00
Punto 5	34,00	72,00	89,00	87,00	87,00	71,00	81,20
Punto 6	37,00	102,00	98,00	99,00	102,00	100,00	100,20
Punto 7	37,00	60,00	59,00	63,00	63,00	64,00	61,80
Punto 8	39,00	115,00	95,00	97,00	115,00	112,00	106,80
Punto 9	38,00	54,00	57,00	59,00	58,00	58,00	57,20
Punto 10	39,00	44,00	34,00	43,00	35,00	42,00	39,60
Punto 11	39,50	71,00	83,00	86,00	87,00	87,00	82,80
Punto 12	40,00	101,00	111,00	110,00	125,00	115,00	112,40
Punto 13	39,00	79,00	72,00	82,00	89,00	92,00	82,80

Prog.	T °C	Medidas de BPN con péndulo de fricción					Prom
Punto 14	39,50	100,00	100,00	102,00	115,00	106,00	104,60
Punto 15	40,00	90,00	97,00	98,00	97,00	97,00	95,80
Punto 16	40,00	105,00	112,00	107,00	98,00	113,00	107,00
Punto 17	40,00	67,00	72,00	73,00	71,00	70,00	70,60
Punto 18	41,00	68,00	71,00	71,00	72,00	74,00	71,20
Punto 19	40,00	65,00	68,00	71,00	73,00	74,00	70,20
Punto 20	38,00	83,00	77,00	71,00	68,00	73,00	74,40
Punto 21	35,00	92,00	75,00	77,00	77,00	77,00	79,60
Punto 22	35,00	87,00	89,00	88,00	88,00	90,00	88,40
Punto 23	35,00	111,00	124,00	112,00	111,00	107,00	113,00
Punto 24	35,00	108,00	102,00	101,00	102,00	101,00	102,80

Punto 25	34,00	87,00	72,00	87,00	86,00	87,00	83,80
Punto 26	35,00	87,00	90,00	90,00	93,00	86,00	89,20
Punto 27	35,00	73,00	87,00	74,00	74,00	75,00	76,60
Punto 28	35,00	64,00	70,00	71,00	73,00	74,00	70,40
Punto 29	33,00	64,00	70,00	71,00	73,00	73,00	70,20
Punto 30	33,00	93,00	79,00	78,00	78,00	78,00	81,20
Punto 31	33,00	72,00	80,00	80,00	80,00	81,00	78,60
Punto 32	32,00	103,00	100,00	104,00	103,00	102,00	102,40
Punto 33	32,00	71,00	72,00	71,00	70,00	70,00	70,80
Punto 34	32,00	75,00	74,00	74,00	73,00	73,00	73,80
Punto 35	30,50	82,00	83,00	83,00	82,00	83,00	82,60
Punto 36	30,00	65,00	62,00	63,00	63,00	63,00	63,20
Punto 37	30,00	67,00	71,00	72,00	71,00	71,00	70,40
Punto 38	29,00	110,00	115,00	115,00	114,00	114,00	113,60
Punto 39	29,50	72,00	75,00	82,00	84,00	85,00	79,60
Punto 40	29,00	90,00	95,00	95,00	97,00	99,00	95,20
Punto 41	21,00	39,00	43,00	42,00	43,00	44,00	42,20
Punto 42	21,00	40,00	45,00	45,00	45,00	45,00	44,00
Punto 43	21,50	38,00	40,00	39,00	40,00	42,00	39,80
Punto 44	23,00	53,00	55,00	55,00	57,00	56,00	55,20
Punto 45	25,00	40,00	39,00	40,00	39,00	40,00	39,60
Punto 46	28,00	35,00	28,00	28,00	30,00	27,00	29,60
Punto 47	29,00	28,00	25,00	24,00	25,00	25,00	25,40
Punto 48	29,00	45,00	44,00	40,00	39,00	41,00	41,80
Punto 49	30,00	55,00	57,00	58,00	57,50	58,00	57,10
Punto 50	31,00	61,00	63,00	62,00	62,00	63,00	62,20
Punto 51	40,00	44,00	43,00	42,00	42,00	42,00	42,60
Punto 52	39,00	64,00	62,00	65,00	67,00	66,00	64,80
Punto 53	40,00	65,00	64,00	65,00	64,00	64,00	64,40

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Estimación de I.F.I. Carril: ida y vuelta

Prog.	T °C	Corr.	Datos corregidos					Prom
Punto 1	29,00	1,85	46,85	47,85	51,85	64,85	48,85	52,05
Punto 2	29,00	1,85	56,85	55,85	60,85	47,85	69,85	58,25
Punto 3	29,00	1,85	48,85	44,85	39,85	43,85	54,85	46,45
Punto 4	30,00	2,00	74,00	91,00	75,00	73,00	82,00	79,00
Punto 5	34,00	2,52	74,52	91,52	89,52	89,52	73,52	83,72
Punto 6	37,00	2,81	104,81	100,81	101,81	104,81	102,81	103,01
Punto 7	37,00	2,81	62,81	61,81	65,81	65,81	66,81	64,61
Punto 8	39,00	2,95	117,95	97,95	99,95	117,95	114,95	109,75
Punto 9	38,00	2,88	56,88	59,88	61,88	60,88	60,88	60,08
Punto 10	39,00	2,95	46,95	36,95	45,95	37,95	44,95	42,55
Punto 11	39,50	2,97	73,97	85,97	88,97	89,97	89,97	85,77
Punto 12	40,00	3,00	104,00	114,00	113,00	128,00	118,00	115,40

Punto 13	39,00	2,95	81,95	74,95	84,95	91,95	94,95	85,75
Punto 14	39,50	2,97	102,97	102,97	104,97	117,97	108,97	107,57
Punto 15	40,00	3,00	93,00	100,00	101,00	100,00	100,00	98,80
Punto 16	40,00	3,00	108,00	115,00	110,00	101,00	116,00	110,00
Punto 17	40,00	3,00	70,00	75,00	76,00	74,00	73,00	73,60
Punto 18	41,00	3,05	71,05	74,05	74,05	75,05	77,05	74,25
Punto 19	40,00	3,00	68,00	71,00	74,00	76,00	77,00	73,20
Punto 20	38,00	2,88	85,88	79,88	73,88	70,88	75,88	77,28
Punto 21	35,00	2,63	94,63	77,63	79,63	79,63	79,63	82,23
Punto 22	35,00	2,63	89,63	91,63	90,63	90,63	92,63	91,03
Punto 23	35,00	2,63	113,63	126,63	114,63	113,63	109,63	115,63
Punto 24	35,00	2,63	110,63	104,63	103,63	104,63	103,63	105,43
Punto 25	34,00	2,52	89,52	74,52	89,52	88,52	89,52	86,32
Punto 26	35,00	2,63	89,63	92,63	92,63	95,63	88,63	91,83
Punto 27	35,00	2,63	75,63	89,63	76,63	76,63	77,63	79,23
Punto 28	35,00	2,63	66,63	72,63	73,63	75,63	76,63	73,03
Punto 29	33,00	2,41	66,41	72,41	73,41	75,41	75,41	72,61
Punto 30	33,00	2,41	95,41	81,41	80,41	80,41	80,41	83,61
Punto 31	33,00	2,41	74,41	82,41	82,41	82,41	83,41	81,01
Punto 32	32,00	2,28	105,28	102,28	106,28	105,28	104,28	104,68
Punto 33	32,00	2,28	73,28	74,28	73,28	72,28	72,28	73,08
Punto 34	32,00	2,28	77,28	76,28	76,28	75,28	75,28	76,08
Punto 35	30,50	2,07	84,07	85,07	85,07	84,07	85,07	84,67
Punto 36	30,00	2,00	67,00	64,00	65,00	65,00	65,00	65,20
Punto 37	30,00	2,00	69,00	73,00	74,00	73,00	73,00	72,40
Punto 38	29,00	1,85	111,85	116,85	116,85	115,85	115,85	115,45
Punto 39	29,50	1,92	73,92	76,92	83,92	85,92	86,92	81,52
Punto 40	29,00	1,85	91,85	96,85	96,85	98,85	100,85	97,05
Punto 41	21,00	0,25	39,25	43,25	42,25	43,25	44,25	42,45
Punto 42	21,00	0,25	40,25	45,25	45,25	45,25	45,25	44,25
Punto 43	21,50	0,36	38,36	40,36	39,36	40,36	42,36	40,16
Punto 44	23,00	0,71	53,71	55,71	55,71	57,71	56,71	55,91
Punto 45	25,00	1,13	41,13	40,13	41,13	40,13	41,13	40,73
Punto 46	28,00	1,68	36,68	29,68	29,68	31,68	28,68	31,28
Punto 47	29,00	1,85	29,85	26,85	25,85	26,85	26,85	27,25
Punto 48	29,00	1,85	46,85	45,85	41,85	40,85	42,85	43,65
Punto 49	30,00	2,00	57,00	59,00	60,00	59,50	60,00	59,10
Punto 50	31,00	2,15	63,15	65,15	64,15	64,15	65,15	64,35
Punto 51	40,00	3,00	47,00	46,00	45,00	45,00	45,00	45,60
Punto 52	39,00	2,95	66,95	64,95	67,95	69,95	68,95	67,75
Punto 53	40,00	3,00	68,00	67,00	68,00	67,00	67,00	67,40
PROMEDIO DEL TRAMO =								74,77

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42. Tratamiento estadístico de ensayos I.F.I. Carril: Ida y Vuelta

Puntos de estudio	Péndulo Británico					DV	E %
	Error Absoluto						
Punto 1	5,21	4,21	0,20	12,80	3,21	5,12	9,84
Punto 2	1,41	2,41	2,60	10,41	11,60	5,68	9,75
Punto 3	2,40	1,61	6,61	2,61	8,40	4,32	9,30
Punto 4	5,00	12,00	4,00	6,00	3,00	6,00	7,59
Punto 5	9,20	7,80	5,80	5,80	10,20	7,76	9,27
Punto 6	1,80	2,21	1,21	1,80	0,20	1,44	1,40
Punto 7	1,80	2,80	1,20	1,20	2,20	1,84	2,85
Punto 8	8,19	11,81	9,81	8,19	5,19	8,64	7,87
Punto 9	3,20	0,20	1,80	0,80	0,80	1,36	2,26
Punto 10	4,40	5,61	3,40	4,61	2,40	4,08	9,59
Punto 11	11,80	0,20	3,20	4,20	4,20	4,72	5,51
Punto 12	11,40	1,40	2,40	12,60	2,60	6,08	5,27
Punto 13	3,81	10,81	0,81	6,19	9,19	6,16	7,18
Punto 14	4,60	4,60	2,60	10,40	1,40	4,72	4,39
Punto 15	5,80	1,20	2,20	1,20	1,20	2,32	2,35
Punto 16	2,00	5,00	0,00	9,00	6,00	4,40	4,00
Punto 17	3,60	1,40	2,40	0,40	0,60	1,68	2,28
Punto 18	3,21	0,20	0,20	0,80	2,80	1,44	1,94
Punto 19	5,20	2,20	0,80	2,80	3,80	2,96	4,04
Punto 20	8,60	2,60	3,40	6,40	1,40	4,48	5,80
Punto 21	12,40	4,61	2,61	2,61	2,61	4,96	6,04
Punto 22	1,41	0,59	0,41	0,41	1,60	0,88	0,97
Punto 23	2,01	11,00	1,01	2,01	6,01	4,40	3,81
Punto 24	5,19	0,81	1,81	0,81	1,81	2,08	1,98
Punto 25	3,20	11,80	3,20	2,20	3,20	4,72	5,47
Punto 26	2,21	0,80	0,80	3,80	3,21	2,16	2,35
Punto 27	3,61	10,40	2,61	2,61	1,61	4,16	5,25
Punto 28	6,41	0,41	0,59	2,60	3,60	2,72	3,72
Punto 29	6,21	0,20	0,80	2,80	2,80	2,56	3,52
Punto 30	11,80	2,21	3,21	3,21	3,21	4,72	5,65
Punto 31	6,61	1,40	1,40	1,40	2,40	2,64	3,26
Punto 32	0,60	2,40	1,60	0,60	0,40	1,12	1,07
Punto 33	0,20	1,20	0,20	0,80	0,80	0,64	0,88
Punto 34	1,20	0,20	0,20	0,80	0,80	0,64	0,84
Punto 35	0,60	0,40	0,40	0,60	0,40	0,48	0,57
Punto 36	1,80	1,20	0,20	0,20	0,20	0,72	1,10
Punto 37	3,40	0,60	1,60	0,60	0,60	1,36	1,88
Punto 38	3,61	1,40	1,40	0,39	0,39	1,44	1,24
Punto 39	7,60	4,60	2,40	4,40	5,40	4,88	5,99
Punto 40	5,21	0,20	0,20	1,80	3,80	2,24	2,31
Punto 41	3,21	0,80	0,20	0,80	1,80	1,36	3,20
Punto 42	4,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,60	3,61
Punto 43	1,80	0,20	0,80	0,20	2,20	1,04	2,59
Punto 44	2,21	0,20	0,20	1,80	0,80	1,04	1,86
Punto 45	0,40	0,60	0,40	0,60	0,40	0,48	1,18

Punto 46	5,40	1,60	1,60	0,40	2,60	2,32	7,42
Punto 47	2,60	0,41	1,41	0,41	0,41	1,04	3,83
Punto 48	3,20	2,20	1,81	2,81	0,81	2,16	4,95
Punto 49	2,10	0,10	0,90	0,40	0,90	0,88	1,49
Punto 50	1,20	0,80	0,20	0,20	0,80	0,64	1,00
Punto 51	1,40	0,40	0,60	0,60	0,60	0,72	1,58
Punto 52	0,81	2,81	0,19	2,19	1,19	1,44	2,12
Punto 53	0,60	0,40	0,60	0,40	0,40	0,48	0,71
Valor Máximo							9,84

Fuente: Elaboración propia.

Determinación de la constante de velocidad S_p

$$S_p = a + b * T_x$$

Las constantes según norma ASTM E 965 son:

a	b
-11,5981	113,63246

Determinación del parámetro F60

$$FR60 = FRs * e^{\frac{S-60}{S_p}}$$

Donde:

FRs = Valor de la fricción obtenida en campo.

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

S_p = Constante de velocidad.

$$F60 = A + B * FR60$$

Las constantes A y B según norma ASTM E 274 son:

A	B
0,078	0,0107

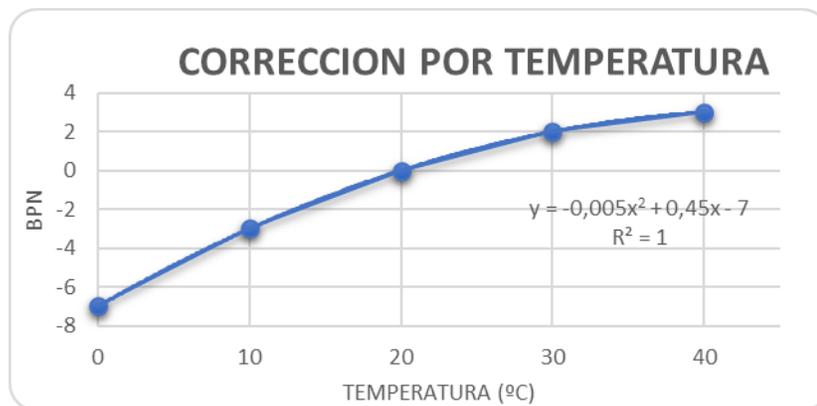
Tabla 43. Resumen de los cálculos I.F.I Carril: Ida y Vuelta

Puntos de Estudio	FRs	Dp	H = Tx	Sp	FR60	F60
Punto 1	52,05	18,50	0,930	94,08	30,59	0,405
Punto 2	58,25	18,50	0,930	94,08	34,24	0,444
Punto 3	46,45	23,60	0,572	53,40	18,21	0,273
Punto 4	79,00	17,70	1,016	103,85	48,81	0,600
Punto 5	83,72	18,30	0,950	96,35	49,83	0,611
Punto 6	103,01	21,20	0,708	68,85	49,83	0,611
Punto 7	64,61	20,60	0,750	73,63	32,76	0,429
Punto 8	109,75	16,20	1,213	126,24	73,86	0,868
Punto 9	60,08	21,10	0,715	69,65	29,31	0,392
Punto 10	42,55	22,50	0,629	59,88	18,46	0,276
Punto 11	85,77	33,00	0,292	21,58	8,46	0,168
Punto 12	115,40	29,70	0,361	29,42	21,10	0,304
Punto 13	85,75	25,00	0,509	46,24	29,08	0,389
Punto 14	107,57	28,20	0,400	33,85	24,56	0,341
Punto 15	98,80	21,80	0,670	64,54	45,53	0,565
Punto 16	110,00	16,30	1,198	124,53	73,62	0,866
Punto 17	73,60	21,50	0,689	66,69	34,78	0,450
Punto 18	74,25	18,40	0,940	95,22	43,92	0,548
Punto 19	73,20	14,60	1,493	158,06	53,35	0,649
Punto 20	77,28	17,70	1,016	103,85	47,75	0,589
Punto 21	82,23	18,40	0,940	95,22	48,64	0,598
Punto 22	91,03	18,90	0,891	89,65	52,12	0,636
Punto 23	115,63	16,10	1,228	127,94	78,23	0,915
Punto 24	105,43	16,90	1,114	114,99	68,25	0,808
Punto 25	86,32	17,40	1,051	107,83	54,29	0,659
Punto 26	91,83	28,90	0,381	31,70	18,96	0,281
Punto 27	79,23	18,60	0,920	92,94	46,27	0,573
Punto 28	73,03	37,80	0,223	13,74	1,92	0,099
Punto 29	72,61	20,80	0,736	72,04	36,27	0,466
Punto 30	83,61	20,90	0,729	71,24	41,44	0,521
Punto 31	81,01	32,80	0,296	22,04	8,38	0,168
Punto 32	104,68	37,10	0,231	14,65	3,45	0,115
Punto 33	73,08	37,10	0,231	14,65	2,41	0,104
Punto 34	76,08	20,20	0,780	77,04	39,75	0,503
Punto 35	84,67	22,30	0,640	61,13	37,37	0,478
Punto 36	65,20	22,70	0,618	58,63	27,79	0,375
Punto 37	72,40	23,10	0,597	56,24	29,76	0,396
Punto 38	115,45	33,70	0,280	20,22	9,74	0,182
Punto 39	81,52	17,70	1,016	103,85	50,37	0,617
Punto 40	97,05	29,90	0,356	28,86	17,16	0,262
Punto 41	42,45	22,60	0,623	59,19	18,24	0,273
Punto 42	44,25	22,00	0,658	63,17	20,05	0,293
Punto 43	40,16	27,40	0,424	36,58	10,24	0,188
Punto 44	55,91	39,60	0,203	11,47	0,71	0,086
Punto 45	40,73	39,40	0,205	11,70	0,57	0,084

Punto 46	31,28	25,00	0,509	46,24	10,61	0,192
Punto 47	27,25	38,60	0,214	12,72	0,53	0,084
Punto 48	43,65	17,00	1,101	113,51	28,10	0,379
Punto 49	59,10	40,00	0,199	11,01	0,63	0,085
Punto 50	64,35	35,20	0,257	17,61	3,76	0,118
Punto 51	45,60	33,20	0,289	21,24	4,33	0,124
Punto 52	67,75	30,20	0,349	28,06	11,40	0,200
Punto 53	67,40	23,20	0,591	55,56	27,40	0,371
Promedio =				63,144		0,396

Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. Corrección por temperatura para BPN con el péndulo de fricción



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.2. Cálculo de la fricción a cualquier velocidad

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

Donde:

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

S = Es la velocidad a la que queremos calcular la fricción

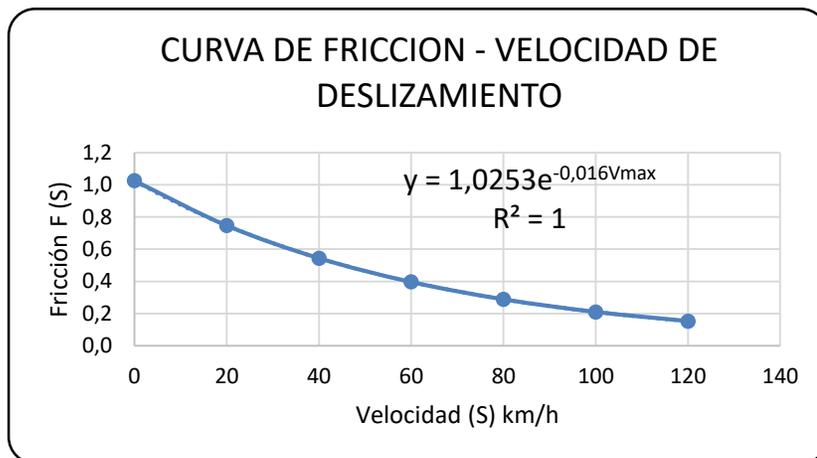
F (S) = Es la fricción encontrada a partir de la velocidad S

Tabla 44. Cálculo de la fricción a cualquier velocidad

S	0	20	40	60	80	100	120
	F(0)	F(20)	F(40)	F(60)	F(80)	F(100)	F(120)
F (S)	1,025	0,747	0,544	0,396	0,289	0,210	0,153

Fuente: Elaboración propia.

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

Figura 38. Curva de fricción – velocidad de deslizamiento

Fuente: Elaboración propia.

Velocidad máxima segura = 63,20 km/hr.

- Tenemos un índice de fricción del tramo de 0,396 que corresponde a una calificación de “**Malo (Derrapamiento del vehículo)**” con una velocidad máxima segura de 63,20 km/hr.

Tabla 45. Datos de evaluación superficial, Carril: Ida y Vuelta

Puntos de estudio	Medidas con el Círculo de arena					Promedio
Punto 1	18,50	17,00	19,00	18,00	20,00	18,50
Punto 2	19,00	18,50	19,00	17,00	19,00	18,50
Punto 3	23,00	23,00	23,50	25,00	23,50	23,60
Punto 4	17,00	18,00	16,50	18,00	19,00	17,70
Punto 5	17,00	19,00	19,00	18,00	18,50	18,30
Punto 6	21,50	20,00	21,50	21,00	22,00	21,20
Punto 7	21,00	19,00	22,00	20,00	21,00	20,60
Punto 8	16,00	16,50	17,00	16,50	15,00	16,20
Punto 9	22,00	20,50	21,00	20,00	22,00	21,10
Punto 10	22,00	21,00	25,00	22,50	22,00	22,50
Punto 11	34,00	31,00	33,00	34,00	33,00	33,00
Punto 12	29,00	29,00	33,00	29,50	28,00	29,70

Punto 13	25,50	26,00	24,00	24,50	25,00	25,00
Punto 14	30,00	27,50	28,50	28,00	27,00	28,20
Punto 15	24,00	22,00	21,00	20,00	22,00	21,80
Punto 16	16,00	15,50	17,00	16,00	17,00	16,30
Punto 17	21,00	20,50	22,00	21,00	23,00	21,50
Punto 18	19,00	19,50	17,50	18,00	18,00	18,40
Punto 19	14,00	14,00	16,00	14,00	15,00	14,60
Punto 20	17,00	18,00	18,50	17,00	18,00	17,70
Punto 21	19,50	18,70	17,50	17,30	19,00	18,40
Punto 22	19,50	17,50	19,50	18,00	20,00	18,90
Punto 23	17,00	17,00	15,00	16,00	15,50	16,10
Punto 24	16,00	18,00	17,00	17,50	16,00	16,90
Punto 25	18,00	17,00	18,00	18,00	16,00	17,40
Punto 26	28,00	28,50	30,00	29,00	29,00	28,90
Punto 27	20,00	18,00	19,00	19,00	17,00	18,60
Punto 28	37,00	38,00	40,00	37,00	37,00	37,80
Punto 29	21,00	20,00	21,50	22,00	19,50	20,80
Punto 30	20,00	19,50	21,50	21,00	22,50	20,90
Punto 31	31,00	36,00	33,00	31,00	33,00	32,80
Punto 32	37,50	37,00	35,00	39,00	37,00	37,10
Punto 33	38,00	36,00	36,50	36,00	39,00	37,10
Punto 34	21,00	20,50	19,00	20,00	20,50	20,20
Punto 35	21,00	21,00	23,50	23,00	23,00	22,30
Punto 36	21,00	22,00	24,00	24,00	22,50	22,70
Punto 37	22,50	22,00	23,00	23,00	25,00	23,10
Punto 38	34,00	34,00	32,00	33,50	35,00	33,70
Punto 39	18,00	19,00	16,00	17,50	18,00	17,70
Punto 40	31,00	28,00	30,00	31,50	29,00	29,90
Punto 41	24,00	23,00	22,00	21,00	23,00	22,60
Punto 42	23,00	21,00	21,00	22,00	23,00	22,00
Punto 43	27,00	26,00	27,00	28,00	29,00	27,40
Punto 44	42,00	40,00	41,00	37,00	38,00	39,60
Punto 45	38,00	37,00	39,00	42,00	41,00	39,40
Punto 46	25,00	23,00	26,00	26,00	25,00	25,00
Punto 47	39,00	36,00	38,00	40,00	40,00	38,60
Punto 48	18,00	17,00	17,00	16,00	17,00	17,00
Punto 49	41,00	38,00	40,00	41,00	40,00	40,00
Punto 50	36,00	33,00	34,00	38,00	35,00	35,20
Punto 51	33,00	34,00	32,00	33,00	34,00	33,20
Punto 52	33,00	29,00	30,00	31,00	28,00	30,20
Punto 53	22,00	23,00	25,00	22,00	24,00	23,20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46. Tratamiento estadístico de error porcentual del círculo de arena

Puntos de estudio	Círculo de arena					DV	E %
	Error absoluto						
Punto 1	0,00	1,50	0,50	0,50	1,50	0,80	4,32
Punto 2	0,50	0,00	0,50	1,50	0,50	0,60	3,24
Punto 3	0,60	0,60	0,10	1,40	0,10	0,56	2,37
Punto 4	0,70	0,30	1,20	0,30	1,30	0,76	4,29
Punto 5	1,30	0,70	0,70	0,30	0,20	0,64	3,50
Punto 6	0,30	1,20	0,30	0,20	0,80	0,56	2,64
Punto 7	0,40	1,60	1,40	0,60	0,40	0,88	4,27
Punto 8	0,20	0,30	0,80	0,30	1,20	0,56	3,46
Punto 9	0,90	0,60	0,10	1,10	0,90	0,72	3,41
Punto 10	0,50	1,50	2,50	0,00	0,50	1,00	4,44
Punto 11	1,00	2,00	0,00	1,00	0,00	0,80	2,42
Punto 12	0,70	0,70	3,30	0,20	1,70	1,32	4,44
Punto 13	0,50	1,00	1,00	0,50	0,00	0,60	2,40
Punto 14	1,80	0,70	0,30	0,20	1,20	0,84	2,98
Punto 15	2,20	0,20	0,80	1,80	0,20	1,04	4,77
Punto 16	0,30	0,80	0,70	0,30	0,70	0,56	3,44
Punto 17	0,50	1,00	0,50	0,50	1,50	0,80	3,72
Punto 18	0,60	1,10	0,90	0,40	0,40	0,68	3,70
Punto 19	0,60	0,60	1,40	0,60	0,40	0,72	4,93
Punto 20	0,70	0,30	0,80	0,70	0,30	0,56	3,16
Punto 21	1,10	0,30	0,90	1,10	0,60	0,80	4,35
Punto 22	0,60	1,40	0,60	0,90	1,10	0,92	4,87
Punto 23	0,90	0,90	1,10	0,10	0,60	0,72	4,47
Punto 24	0,90	1,10	0,10	0,60	0,90	0,72	4,26
Punto 25	0,60	0,40	0,60	0,60	1,40	0,72	4,14
Punto 26	0,90	0,40	1,10	0,10	0,10	0,52	1,80
Punto 27	1,40	0,60	0,40	0,40	1,60	0,88	4,73
Punto 28	0,80	0,20	2,20	0,80	0,80	0,96	2,54
Punto 29	0,20	0,80	0,70	1,20	1,30	0,84	4,04
Punto 30	0,90	1,40	0,60	0,10	1,60	0,92	4,40
Punto 31	1,80	3,20	0,20	1,80	0,20	1,44	4,39
Punto 32	0,40	0,10	2,10	1,90	0,10	0,92	2,48
Punto 33	0,90	1,10	0,60	1,10	1,90	1,12	3,02
Punto 34	0,80	0,30	1,20	0,20	0,30	0,56	2,77
Punto 35	1,30	1,30	1,20	0,70	0,70	1,04	4,66
Punto 36	1,70	0,70	1,30	1,30	0,20	1,04	4,58
Punto 37	0,60	1,10	0,10	0,10	1,90	0,76	3,29
Punto 38	0,30	0,30	1,70	0,20	1,30	0,76	2,26
Punto 39	0,30	1,30	1,70	0,20	0,30	0,76	4,29
Punto 40	1,10	1,90	0,10	1,60	0,90	1,12	3,75
Punto 41	1,40	0,40	0,60	1,60	0,40	0,88	3,89
Punto 42	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,80	3,64
Punto 43	0,40	1,40	0,40	0,60	1,60	0,88	3,21
Punto 44	2,40	0,40	1,40	2,60	1,60	1,68	4,24
Punto 45	1,40	2,40	0,40	2,60	1,60	1,68	4,26

Punto 46	0,00	2,00	1,00	1,00	0,00	0,80	3,20
Punto 47	0,40	2,60	0,60	1,40	1,40	1,28	3,32
Punto 48	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,40	2,35
Punto 49	1,00	2,00	0,00	1,00	0,00	0,80	2,00
Punto 50	0,80	2,20	1,20	2,80	0,20	1,44	4,09
Punto 51	0,20	0,80	1,20	0,20	0,80	0,64	1,93
Punto 52	2,80	1,20	0,20	0,80	2,20	1,44	4,77
Punto 53	1,20	0,20	1,80	1,20	0,80	1,04	4,48
Valor máximo							4,93

Fuente: Elaboración propia.

Determinación de la textura del pavimento

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

Donde:

H = Tx; la altura de la textura media

V = Volumen de arena utilizado, V = 25000 m³

D = Diámetro medio del círculo de arena

Resultados del ensayo círculo de arena, método para determinar la textura superficial del pavimento

Tabla 47. Resultados del ensayo círculo de arena.

Volumen de la muestra (mm³)		Peso para el volumen de la muestra (gr)	
Volumen (mm ³) =	25000,00	Peso constante (gr) =	31,90

Identificación	Diámetros de los círculos (mm)					Diámetro promedio (mm)	MTD
	1	2	3	4	5		Profundidad media de macrotextura (mm)
Punto 1	185	170	190	180	200	185,00	0,93
Punto 2	190	185	190	170	190	185,00	0,93
Punto 3	230	230	235	250	235	236,00	0,57
Punto 4	170	180	165	180	190	177,00	1,02
Punto 5	170	190	190	180	185	183,00	0,95

Punto 6	215	200	215	210	220	212,00	0,71
Punto 7	210	190	220	200	210	206,00	0,75
Punto 8	160	165	170	165	150	162,00	1,21
Punto 9	240	205	240	190	230	221,00	0,65
Punto 10	220	210	250	225	220	225,00	0,63
Punto 11	340	310	330	340	330	330,00	0,29
Punto 12	290	290	330	295	280	297,00	0,36
Punto 13	255	260	240	245	250	250,00	0,51
Punto 14	300	275	285	280	270	282,00	0,40
Punto 15	270	220	210	200	220	224,00	0,63
Punto 16	160	155	170	160	170	163,00	1,20
Punto 17	210	205	220	210	230	215,00	0,69
Punto 18	200	195	170	180	180	185,00	0,93
Punto 19	140	140	160	125	150	143,00	1,56
Punto 20	170	180	185	170	180	177,00	1,02
Punto 21	210	190	170	165	190	185,00	0,93
Punto 22	195	175	195	170	220	191,00	0,87
Punto 23	170	170	150	160	155	161,00	1,23
Punto 24	150	200	180	175	160	173,00	1,06
Punto 25	180	170	180	190	160	176,00	1,03
Punto 26	280	285	300	290	290	289,00	0,38
Punto 27	210	180	190	190	150	184,00	0,94
Punto 28	370	380	400	370	370	378,00	0,22
Punto 29	210	180	215	220	195	204,00	0,76
Punto 30	200	190	230	210	240	214,00	0,70
Punto 31	310	360	330	310	330	328,00	0,30
Punto 32	375	370	350	390	370	371,00	0,23
Punto 33	380	360	365	360	390	371,00	0,23
Punto 34	210	205	190	200	205	202,00	0,78
Punto 35	210	205	235	250	235	227,00	0,62
Punto 36	210	220	240	240	225	227,00	0,62
Punto 37	225	220	230	230	250	231,00	0,60
Punto 38	340	340	320	335	350	337,00	0,28
Punto 39	190	190	160	175	180	179,00	0,99
Punto 40	330	280	300	315	290	303,00	0,35
Punto 41	240	230	220	200	230	224,00	0,63
Punto 42	230	210	210	200	230	216,00	0,68
Punto 43	270	260	270	280	290	274,00	0,42

Punto 44	420	460	410	370	360	404,00	0,20
Punto 45	380	370	390	440	410	398,00	0,20
Punto 46	250	210	260	260	250	246,00	0,53
Punto 47	390	360	380	400	400	386,00	0,21
Punto 48	180	170	170	160	170	170,00	1,10
Punto 49	410	380	400	410	400	400,00	0,20
Punto 50	360	330	340	400	350	356,00	0,25
Punto 51	330	340	320	330	340	332,00	0,29
Punto 52	330	260	300	310	280	296,00	0,36
Punto 53	220	230	250	220	240	232,00	0,59
PROMEDIO =							0,66

Fuente: Elaboración propia.

- Dando una calificación a la profundidad media de macrotextura del tramo que tiene un resultado de 0,66 mm corresponde a una calificación “**Media**”.
- La irregularidad del pavimento produce elevaciones verticales, las cuales son experimentadas por los pasajeros como vibraciones.
- Las irregularidades de la superficie de rodadura causan ruido tanto dentro del auto como a su alrededor, lo cual probablemente pasaría desapercibido por el conductor.

Al estar la carretera de los choferes en malas condiciones según la irregularidad, se dificulta el manejo debido a cambios de velocidad y movimientos bruscos, ocasionando un desgaste en las llantas y un aumento en el consumo de combustible, generando inconformidad en los usuarios.

4.2. Procedimiento de Evaluación Estructural

4.2.1. Procedimiento de cálculo de la deflexión del pavimento

Tabla 48. Datos de los parámetros geométricos de la viga Benkelman

Evaluación Estructural					
Tramo: " Cruce Alto Senac - San Andrés"					
Medición de deflexiones por el método de la viga Benkelman					
Estructura:	Pavimento flexible	Carga Eje(tn):	10,8	Presión (Psi)	80
Carril:	Derecho (ida)	Fecha:	22/3/2021		
Relación de brazos:	1 a 2	Ejecutor:	Rodrigo Eduardo Vega Yucra		

Fuente: Elaboración propia.

a) **Teniendo las mediciones efectuadas en campo****Tabla 49.** Mediciones en campo (Viga Benkelman – Carril: Derecho (ida))

Progresiva (Km)	Lecturas del dial					
	L- a 0cm 0.01 mm	L- a 50cm 0.01 mm	L- a 100cm 0.01 mm	L- a 150cm 0.01 mm	L- a 200cm 0.01 mm	L-a 500cm 0.01 mm
00+000	0	8	10	12	14	14
00+200	0	11	13	18	22	24
00+400	0	8	11	16	20	20
00+500	0	6	0	0	2	30
00+600	0	3	12	16	16	17
00+800	10	36	36	36	38	38
01+000	0	4	4	4	6	8
01+100	0	4	4	6	6	6
01+200	0	3	11	12	15	15
01+400	0	8	10	11	17	18
01+600	0	4	6	8	10	10
01+800	6	10	10	18	30	32
02+000	0	4	0	0	0	12
02+200	0	16	16	16	16	22
02+400	2	6	6	8	18	26
02+600	0	6	9	10	16	22
02+800	30	34	34	34	36	58
03+000	0	2	12	12	15	15
03+100	8	28	28	42	38	38
03+200	0	11	14	19	23	24
03+400	0	7	10	12	14	19
03+600	0	16	16	17	17	18
03+800	0	2	2	4	5	5
04+000	0	4	18	18	27	28
04+200	0	4	8	20	25	27
04+400	0	9	15	18	25	25
04+600	0	8	18	20	21	22
04+800	0	5	15	18	25	25
05+000	0	8	16	20	22	22
05+170	4	10	10	10	10	34
05+200	0	2	20	25	28	28
05+400	0	9	16	20	28	30
05+560	0	2	2	0	4	6
05+600	0	13	18	24	24	24
05+800	0	18	18	26	26	26
06+000	0	16	18	20	27	30
06+200	0	4	4	6	6	8
06+400	0	10	14	14	19	20
06+600	0	4	4	6	6	8

06+800	0	16	17	26	26	26
07+000	2	6	4	6	18	24
07+200	0	22	22	22	27	30
07+400	0	2	2	0	0	6
07+600	0	16	18	21	22	23
07+800	0	12	12	14	18	18
08+000	0	10	12	12	18	20
08+200	0	2	4	4	0	16
08+400	0	11	14	16	20	20
08+600	0	8	12	16	26	28
08+800	0	4	16	22	22	24
09+000	0	10	15	18	22	24
09+200	0	8	12	12	20	20
09+400	0	3	2	0	4	4
09+800	0	2	4	4	6	10
10+000	10	20	20	22	22	34
10+400	2	4	0	6	4	12
10+800	0	4	8	10	22	22
11+200	2	6	6	6	8	10
11+500	0	4	4	4	6	6
11+900	0	2	2	4	2	4
12+200	36	46	46	48	54	54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 50. Mediciones en campo (Viga Benkelman – Carril: Izquierdo (vuelta))

Progresiva (Km)	Lecturas del dial					
	L- a 0cm	L- a 50cm	L- a 100cm	L- a 150cm	L- a 200cm	L-a 500cm
	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm
00+000	0	8	12	12	24	24
00+100	0	7	10	15	18	18
00+300	0	10	12	15	18	20
00+500	0	10	15	17	20	22
00+700	0	4	10	13	15	22
00+900	0	14	16	18	22	24
01+100	0	2	8	8	10	11
01+300	0	4	6	6	10	12
01+500	0	3	9	12	15	15
01+600	10	24	24	24	32	40
01+700	0	2	13	17	17	18
01+900	0	6	9	10	15	18
02+100	0	18	20	20	22	22
02+300	0	8	8	11	12	12
02+500	0	3	14	16	16	16
02+900	0	6	10	14	19	20
03+100	0	2	13	15	16	16

03+300	0	6	8	14	14	16
03+500	0	18	20	20	21	21
03+900	0	2	3	4	6	6
04+100	0	8	14	14	15	16
04+200	0	8	14	18	22	22
04+300	0	10	12	13	15	15
04+500	0	10	18	20	25	25
04+700	0	12	16	19	20	20
04+900	0	13	18	20	24	26
05+100	0	11	14	18	20	23
05+200	0	2	2	4	4	4
05+300	0	2	16	20	24	24
05+500	0	2	4	6	6	6
05+700	0	9	20	23	24	26
05+900	0	17	24	26	28	29
06+100	0	18	18	18	22	24
06+200	0	10	24	24	28	30
06+300	0	8	14	17	18	20
06+500	0	14	18	23	26	26
06+700	0	18	23	24	26	26
06+900	0	16	18	20	22	22
07+300	0	16	16	19	24	25
07+400	0	8	8	12	12	14
07+700	0	9	14	18	25	26
07+900	0	12	12	12	16	18
08+100	0	12	17	18	20	20
08+300	0	18	18	18	24	26
08+400	0	4	8	8	10	10
08+500	0	15	16	24	28	28
08+700	0	17	18	18	27	30
08+900	0	16	20	27	29	30
09+100	0	2	20	26	26	26
09+300	0	2	2	2	6	6
09+350	0	3	4	4	6	6
09+500	0	13	18	24	24	24
10+100	0	12	15	16	18	20
10+300	0	4	0	0	0	8
10+400	0	4	4	4	6	6
10+700	0	4	4	6	8	8
10+900	0	13	14	16	21	20
11+300	2	6	2	0	6	24
11+400	0	6	10	14	16	24
11+700	0	22	22	22	27	30
12+200	0	10	14	18	18	20

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.1. Cálculo de la deflexión máxima

Una vez recogidos los datos de campo en el tramo de estudio, se procedió a calcular los indicadores de estado de la estructura del pavimento, que son dos los cuales se muestran como ejemplo a continuación.

Para el ejemplo de cálculo se tomarán los datos recogidos en la progresiva 0+000 del carril de ida.

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

$$D_o = 2 * (14 - 0)$$

$$D = 28 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Factor de corrección por temperatura:

El valor de las deflexiones debe corregirse por temperatura según la norma, por lo tanto, nos dice que deben ser llevadas a una temperatura de 20°C.

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

$$D_{ot} = \frac{28}{0.001 \frac{^\circ\text{C}}{\text{cm}} * (29 - 20) * 5 + 1}$$

$$D_{ot} = 27 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Deflexión a 50 cm

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

$$D_{50} = 2 * (14 - 8)$$

$$D_{50} = 12 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Factor de corrección por temperatura:

$$D_{50t} = \frac{D_{50}}{k * (t - 20^\circ\text{C}) * e + 1}$$

$$D_{50t} = \frac{12}{0.001 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{cm}} * (29 - 20^{\circ}\text{C}) * 5 + 1}$$

$$Dot = 11x10^{-2}mm$$

Radio de curvatura:

$$Rc = \frac{6250}{K * (Dot - D_{50t})}$$

$$Rc = \frac{6250}{2 * (27 - 11)}$$

$$Rc = 204x10^{-2}m$$

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

Deflexión característica:

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

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.

Deflexión admisible:

Del estudio de tráfico del tramo Cruce Alto Senac – San Andrés tenemos:

ESAL's de diseño = 1015118

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

$$N18 = 1015118$$

$$Da = \left(\frac{1,15}{1,015118} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Da = 1,03 \text{ mm}$$

4.2.1.2. Resultados de la evaluación estructural

A continuación, se muestran los resultados de las deflexiones y radios de curvatura obtenidos en la evaluación estructural siguiendo el método de la viga Benkelman:

Tabla 51. Rangos de la evaluación estructural

Rangos mínimos y máximos de deflexiones	Rangos mínimos y máximos de radios de curvatura
$Do < Dc < Da$ $Do < Dc < 1,03 \text{ mm}$	$100 < Rc < 500$

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 52. Resultados de la viga Benkelman en el carril derecho (ida)

(Nº)	PROGRESI VA (Km)	LECTURAS DEL DIAL						PARÁMETROS DE EVALUACIÓN			PARÁMETROS DE EVALUACIÓN CORREGIDOS POR TEMP. A 20 °C			TEMPERATU RAS		Espesor asfalto (cm)	D*Rc
		L- a 0cm 0.01 mm	L- a 50cm 0.01 mm	L- a 100cm 0.01 mm	L- a 150cm 0.01 mm	L- a 200cm 0.01 mm	L-a 500cm 0.01 mm	Do (0.01 mm)	D50 (0.01 mm)	Rc (m)	Do (0.01 mm)	D50 (0.01 mm)	Rc (m)	Am b °C	Asfalt o °C		
1	00+000	0	8	10	12	14	14	28,00	12,00	195	27	11	204	16,0	29,0	5,0	5.469
2	00+200	0	11	13	18	22	24	48,00	26,00	142	46	25	148	16,0	29,0	5,0	6.818
3	00+400	0	8	11	16	20	20	40,00	24,00	195	38	23	204	16,0	29,0	5,0	7.813
4	00+500	0	6	0	0	2	30	60,00	48,00	260	57	46	272	16,0	29,0	5,0	15.625
5	00+600	0	3	12	16	16	17	34,00	28,00	521	32	27	547	17,0	30,0	5,0	17.708
6	00+800	10	36	36	36	38	38	56,00	4,00	60	53	4	63	17,0	30,0	5,0	3.365
7	01+000	0	4	4	4	6	8	16,00	8,00	391	15	7	418	17,0	34,0	5,0	6.250
8	01+100	0	4	4	6	6	6	12,00	4,00	391	11	4	424	18,0	37,0	5,0	4.688
9	01+200	0	3	11	12	15	15	30,00	24,00	521	28	22	565	17,0	37,0	5,0	15.625
10	01+400	0	8	10	11	17	18	36,00	20,00	195	33	18	214	20,0	39,0	5,0	7.031
11	01+600	0	4	6	8	10	10	20,00	12,00	391	18	11	428	20,0	39,0	5,0	7.813
12	01+800	6	10	10	18	30	32	52,00	44,00	391	48	40	426	21,0	38,0	5,0	20.313
13	02+000	0	4	0	0	0	12	24,00	16,00	391	22	15	428	21,0	39,0	5,0	9.375
14	02+200	0	16	16	16	16	22	44,00	12,00	98	40	11	107	21,0	40,0	5,0	4.297
15	02+400	2	6	6	8	18	26	48,00	40,00	391	44	36	430	21,0	40,0	5,0	18.750
16	02+600	0	6	9	10	16	22	44,00	32,00	260	40	29	286	22,0	39,5	5,0	11.458
17	02+800	30	34	34	34	36	58	56,00	48,00	391	51	44	430	21,0	40,0	5,0	21.875
18	03+000	0	2	12	12	15	15	30,00	26,00	781	27	24	859	23,0	40,0	5,0	23.438
19	03+100	8	28	28	42	38	38	60,00	20,00	78	55	18	86	22,0	40,0	5,0	4.688
20	03+200	0	11	14	19	23	24	48,00	26,00	142	44	24	156	23,0	40,0	5,0	6.818
21	03+400	0	7	10	12	14	19	38,00	24,00	223	34	22	247	23,0	41,0	5,0	8.482
22	03+600	0	16	16	17	17	18	36,00	4,00	98	33	4	107	23,0	40,0	5,0	3.516
23	03+800	0	2	2	4	5	5	10,00	6,00	781	9	5	859	23,0	40,0	5,0	7.813
24	04+000	0	4	18	18	27	28	56,00	48,00	391	52	45	420	23,0	35,0	5,0	21.875
25	04+200	0	4	8	20	25	27	54,00	46,00	391	50	43	420	23,0	35,0	5,0	21.094
26	04+400	0	9	15	18	25	25	50,00	32,00	174	47	30	187	23,0	35,0	5,0	8.681
27	04+600	0	8	18	20	21	22	44,00	28,00	195	41	26	210	23,0	35,0	5,0	8.594
28	04+800	0	5	15	18	25	25	50,00	40,00	313	47	37	334	23,0	34,0	5,0	15.625

29	05+000	0	8	16	20	22	22	44,00	28,00	195	41	26	210	21,0	35,0	5,0	8.594
30	05+170	4	10	10	10	10	34	60,00	48,00	260	55	44	286	23,0	40,0	5,0	15.625
31	05+200	0	2	20	25	28	28	56,00	52,00	781	52	48	840	22,0	35,0	5,0	43.750
32	05+400	0	9	16	20	28	30	60,00	42,00	174	56	39	187	22,0	35,0	5,0	10.417
33	05+560	0	2	2	0	4	6	12,00	8,00	781	11	7	840	23,0	35,0	5,0	9.375
34	05+600	0	13	18	24	24	24	48,00	22,00	120	45	21	128	21,0	33,0	5,0	5.769
35	05+800	0	18	18	26	26	26	52,00	16,00	87	49	15	92	21,0	33,0	5,0	4.514
36	06+000	0	16	18	20	27	30	60,00	28,00	98	56	26	104	21,0	33,0	5,0	5.859
37	06+200	0	4	4	6	6	8	16,00	8,00	391	15	7	420	23,0	35,0	5,0	6.250
38	06+400	0	10	14	14	19	20	40,00	20,00	156	38	19	166	17,0	32,0	5,0	6.250
39	06+600	0	4	4	6	6	8	16,00	8,00	391	15	7	420	23,0	35,0	5,0	6.250
40	06+800	0	16	17	26	26	26	52,00	20,00	98	49	19	103	15,0	30,5	5,0	5.078
41	07+000	2	6	4	6	18	24	44,00	36,00	391	41	33	420	23,0	35,0	5,0	17.188
42	07+200	0	22	22	22	27	30	60,00	16,00	71	57	15	75	15,0	30,0	5,0	4.261
43	07+400	0	2	2	0	0	6	12,00	8,00	781	11	7	836	23,0	34,0	5,0	9.375
44	07+600	0	16	18	21	22	23	46,00	14,00	98	44	13	102	15,0	29,5	5,0	4.492
45	07+800	0	12	12	14	18	18	36,00	12,00	130	34	11	136	15,0	29,5	5,0	4.688
46	08+000	0	10	12	12	18	20	40,00	20,00	156	38	19	164	15,0	29,5	5,0	6.250
47	08+200	0	2	4	4	0	16	32,00	28,00	781	30	26	840	22,0	35,0	5,0	25.000
48	08+400	0	11	14	16	20	20	40,00	18,00	142	38	17	149	15,0	29,5	5,0	5.682
49	08+600	0	8	12	16	26	28	56,00	40,00	195	53	38	205	15,0	29,5	5,0	10.938
50	08+800	0	4	16	22	22	24	48,00	40,00	391	46	38	409	15,0	29,5	5,0	18.750
51	09+000	0	10	15	18	22	24	48,00	28,00	156	46	27	164	15,0	29,5	5,0	7.500
52	09+200	0	8	12	12	20	20	40,00	24,00	195	38	23	205	15,0	29,5	5,0	7.813
53	09+400	0	3	2	0	4	4	8,00	2,00	521	8	2	552	17,0	32,0	5,0	4.167
54	09+800	0	2	4	4	6	10	20,00	16,00	781	19	15	828	17,0	32,0	5,0	15.625
55	10+000	10	20	20	22	22	34	48,00	28,00	156	45	26	166	15,0	32,0	5,0	7.500
56	10+400	2	4	0	6	4	12	20,00	16,00	781	19	15	822	15,0	30,5	5,0	15.625
57	10+800	0	4	8	10	22	22	44,00	36,00	391	42	34	410	15,0	30,0	5,0	17.188
58	11+200	2	6	6	6	8	10	16,00	8,00	391	15	8	410	15,0	30,0	5,0	6.250
59	11+500	0	4	4	4	6	6	12,00	4,00	391	11	4	408	15,0	29,0	5,0	4.688
60	11+900	0	2	2	4	2	4	8,00	4,00	781	8	4	818	15,0	29,5	5,0	6.250
61	12+200	36	46	46	48	54	54	36,00	16,00	156	34	15	163	15,0	29,0	5,0	5.625

Fuente: Elaboración propia.

Calculo deflexión característica (Dc):

NÚMERO DE MUESTRAS	61	61	61
SUMATORIA	2201	1322	21556
PROMEDIO:	36,1	21,7	353,4
DEFLEXIÓN MÍNIMA	8	2	63
DEFLEXIÓN MÁXIMA	57	48	859
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	15,0	12,8	243,3
VARIANZA	223,7	163,3	59202,3
COEFICIENTE DE VAR.	41,4	58,9	68,9
VALOR CARACTERÍSTICO	61	42,7	753,6

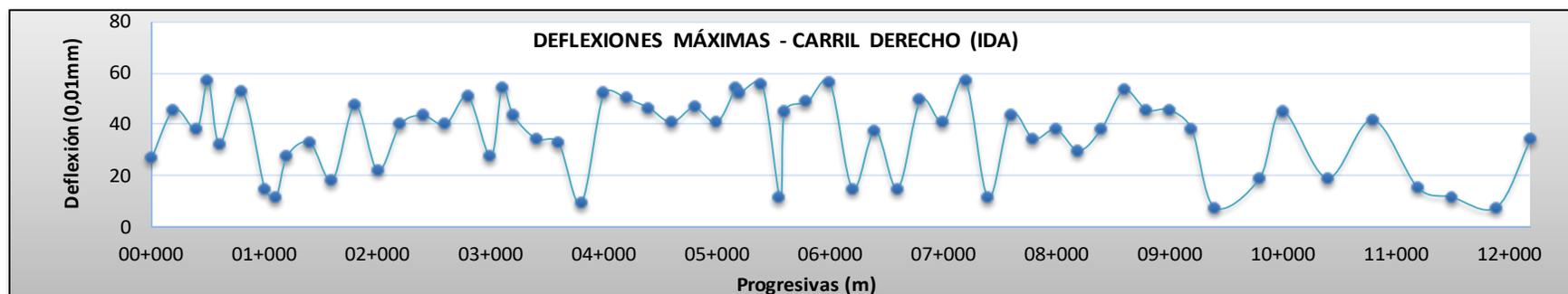
$$D_c = D + t * D_s$$

Donde:

D =Deflexión recuperable promedio = 36,1
 Ds = Desviación standard = 15,0
 t = constante de probabilidad al 95% = 1,645

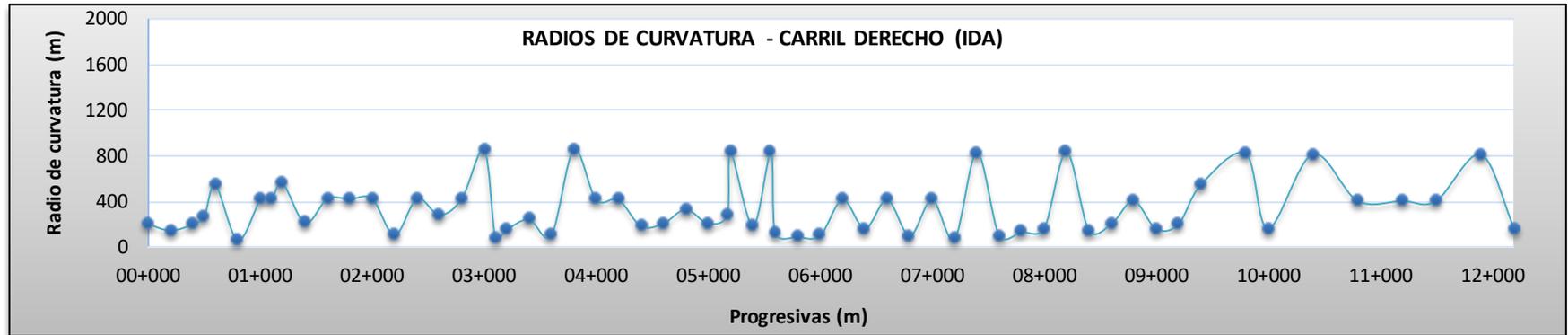
$$D_c = 61 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Gráfico 1. Deflexiones máximas carril derecho (Ida)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 2. Radios de curvatura carril derecho (Ida)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 53. Resultados de la viga Benkelman en el carril izquierdo (Vuelta)

Nº	PROGRESIVA (Km)	LECTURAS DEL DIAL						PARÁMETROS DE EVALUACIÓN			PARÁMETROS DE EVALUACIÓN CORREGIDOS POR TEMPERATURA A 20 °C			TEMPERATURAS		Espesor asfalto (cm)	D*Re
		L- a 0cm	L- a 50cm	L- a 100cm	L- a 150cm	L- a 200cm	L- a 500cm	Do	D50	Rc	Do	D50	Rc	Amb	Asfalto		
		0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	(0.01 mm)	(0.01 mm)	(m)	(0.01 mm)	(0.01 mm)	(m)	°C	°C		
1	00+000	0	8	12	12	24	24	48,00	32,00	195	46	31	204	16,0	29,0	5,0	9.375
2	00+100	0	7	10	15	18	18	36,00	22,00	223	34	21	233	16,0	29,0	5,0	8.036
3	00+300	0	10	12	15	18	20	40,00	20,00	156	38	19	163	16,0	29,0	5,0	6.250
4	00+500	0	10	15	17	20	22	44,00	24,00	156	42	23	163	16,0	29,0	5,0	6.875
5	00+700	0	4	10	13	15	22	44,00	36,00	391	42	34	408	16,0	29,0	5,0	17.188
6	00+900	0	14	16	18	22	24	48,00	20,00	112	46	19	117	17,0	30,0	5,0	5.357
7	01+100	0	2	8	8	10	11	22,00	18,00	781	21	17	820	17,0	30,0	5,0	17.188
8	01+300	0	4	6	6	10	12	24,00	16,00	391	22	15	418	17,0	34,0	5,0	9.375
9	01+500	0	3	9	12	15	15	30,00	24,00	521	28	22	557	17,0	34,0	5,0	15.625
10	01+600	10	24	24	24	32	40	60,00	32,00	112	55	29	122	19,0	39,0	5,0	6.696
11	01+700	0	2	13	17	17	18	36,00	32,00	781	33	29	848	18,0	37,0	5,0	28.125
12	01+900	0	6	9	10	15	18	36,00	24,00	260	33	22	283	18,0	37,0	5,0	9.375
13	02+100	0	18	20	20	22	22	44,00	8,00	87	41	7	94	17,0	37,0	5,0	3.819

14	02+300	0	8	8	11	12	12	24,00	8,00	195	22	7	212	17,0	37,0	5,0	4.688
15	02+500	0	3	14	16	16	16	32,00	26,00	521	29	24	570	20,0	39,0	5,0	16.667
16	02+900	0	6	10	14	19	20	40,00	28,00	260	37	26	284	21,0	38,0	5,0	10.417
17	03+100	0	2	13	15	16	16	32,00	28,00	781	29	26	852	21,0	38,0	5,0	25.000
18	03+300	0	6	8	14	14	16	32,00	20,00	260	29	18	285	21,0	39,0	5,0	8.333
19	03+500	0	18	20	20	21	21	42,00	6,00	87	38	5	95	21,0	39,0	5,0	3.646
20	03+900	0	2	3	4	6	6	12,00	8,00	781	11	7	859	21,0	40,0	5,0	9.375
21	04+100	0	8	14	14	15	16	32,00	16,00	195	29	15	215	21,0	40,0	5,0	6.250
22	04+200	0	8	14	18	22	22	44,00	28,00	195	42	27	205	16,0	30,0	5,0	8.594
23	04+300	0	10	12	13	15	15	30,00	10,00	156	27	9	171	22,0	39,0	5,0	4.688
24	04+500	0	10	18	20	25	25	50,00	30,00	156	46	27	171	22,0	39,5	5,0	7.813
25	04+700	0	12	16	19	20	20	40,00	16,00	130	36	15	143	21,0	40,0	5,0	5.208
26	04+900	0	13	18	20	24	26	52,00	26,00	120	47	24	132	23,0	40,0	5,0	6.250
27	05+100	0	11	14	18	20	23	46,00	24,00	142	42	22	156	22,0	39,0	5,0	6.534
28	05+200	0	2	2	4	4	4	8,00	4,00	781	7	4	855	23,0	39,0	5,0	6.250
29	05+300	0	2	16	20	24	24	48,00	44,00	781	44	40	859	23,0	40,0	5,0	37.500
30	05+500	0	2	4	6	6	6	12,00	8,00	781	11	7	859	22,0	40,0	5,0	9.375
31	05+700	0	9	20	23	24	26	52,00	34,00	174	47	31	191	23,0	40,0	5,0	9.028
32	05+900	0	17	24	26	28	29	58,00	24,00	92	53	22	101	23,0	40,0	5,0	5.331
33	06+100	0	18	18	18	22	24	48,00	12,00	87	43	11	96	23,0	41,0	5,0	4.167
34	06+200	0	10	24	24	28	30	60,00	40,00	156	57	38	163	16,0	29,0	5,0	9.375
35	06+300	0	8	14	17	18	20	40,00	24,00	195	36	22	215	23,0	40,0	5,0	7.813
36	06+500	0	14	18	23	26	26	52,00	24,00	112	47	22	123	23,0	40,0	5,0	5.804
37	06+700	0	18	23	24	26	26	52,00	16,00	87	47	15	95	23,0	40,0	5,0	4.514
38	06+900	0	16	18	20	22	22	44,00	12,00	98	41	11	105	23,0	35,0	5,0	4.297
39	07+300	0	16	16	19	24	25	50,00	18,00	98	45	16	107	23,0	40,0	5,0	4.883
40	07+400	0	8	8	12	12	14	28,00	12,00	195	26	11	213	22,0	38,0	5,0	5.469
41	07+700	0	9	14	18	25	26	52,00	34,00	174	47	31	192	23,0	41,0	5,0	9.028
42	07+900	0	12	12	12	16	18	36,00	12,00	130	33	11	140	23,0	35,0	5,0	4.688
43	08+100	0	12	17	18	20	20	40,00	16,00	130	37	15	139	23,0	34,0	5,0	5.208
44	08+300	0	18	18	18	24	26	52,00	16,00	87	47	15	95	23,0	40,0	5,0	4.514
45	08+400	0	4	8	8	10	10	20,00	12,00	391	19	11	420	21,0	35,0	5,0	7.813
46	08+500	0	15	16	24	28	28	56,00	26,00	104	52	24	112	21,0	35,0	5,0	5.833
47	08+700	0	17	18	18	27	30	60,00	26,00	92	55	24	101	23,0	40,0	5,0	5.515

48	08+900	0	16	20	27	29	30	60,00	28,00	98	56	26	105	22,0	35,0	5,0	5.859
49	09+100	0	2	20	26	26	26	52,00	48,00	781	48	45	840	22,0	35,0	5,0	40.625
50	09+300	0	2	2	2	6	6	12,00	8,00	781	11	7	840	23,0	35,0	5,0	9.375
51	09+350	0	3	4	4	6	6	12,00	6,00	521	12	6	529	14,0	23,0	5,0	6.250
52	09+500	0	13	18	24	24	24	48,00	22,00	120	45	21	128	21,0	33,0	5,0	5.769
53	10+100	0	12	15	16	18	20	40,00	16,00	130	38	15	138	17,0	32,0	5,0	5.208
54	10+300	0	4	0	0	0	8	16,00	8,00	391	15	7	420	23,0	35,0	5,0	6.250
55	10+400	0	4	4	4	6	6	12,00	4,00	391	12	4	393	14,0	21,0	5,0	4.688
56	10+700	0	4	4	6	8	8	16,00	8,00	391	15	7	420	23,0	35,0	5,0	6.250
57	10+900	0	13	14	16	21	20	40,00	14,00	120	38	13	127	15,0	32,0	5,0	4.808
58	11+300	2	6	2	0	6	24	44,00	36,00	391	41	33	420	23,0	35,0	5,0	17.188
59	11+400	0	6	10	14	16	24	48,00	36,00	260	48	36	262	14,0	21,0	5,0	12.500
60	11+700	0	22	22	22	27	30	60,00	16,00	71	57	15	75	15,0	30,0	5,0	4.261
61	12+200	0	10	14	18	18	20	40,00	20,00	156	37	19	167	23,0	34,0	5,0	6.250

Fuente: Elaboración Propia.

Calculo deflexión característica (Dc):

NÚMERO DE MUESTRAS	61	61	61
SUMATORIA	2216	1176	18828
PROMEDIO:	36,3	19,3	308,7
DEFLEXIÓN MÍNIMA	7	4	75
DEFLEXIÓN MÁXIMA	57	45	859
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	13,2	9,7	257,0
VARIANZA	174,9	93,7	66067,5
COEFICIENTE DE VAR.	36,4	50,2	83,3
VALOR CARACTERÍSTICO	58	35,2	731,5

$$D_c = D + t * D_s$$

Donde:

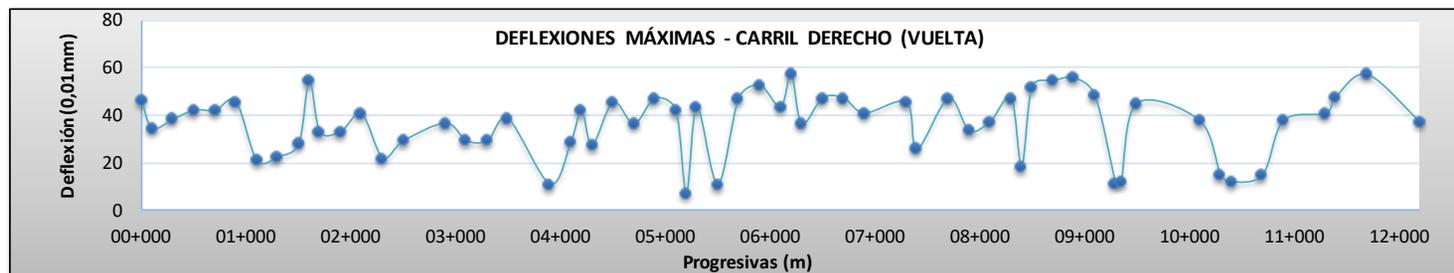
D =Deflexión recuperable promedio = 36,3

Ds = Desviación standard = 13,2

t = constante de probabilidad al 95% = 1,645

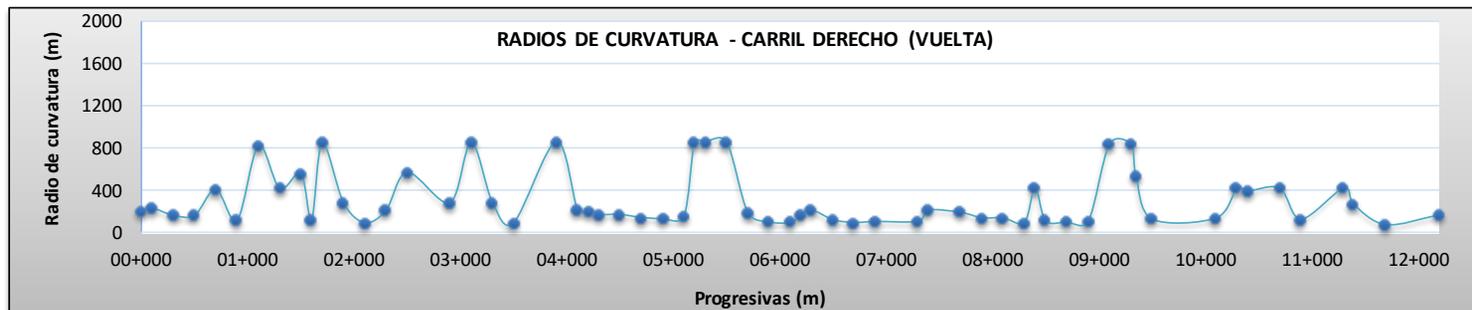
$$D_c = 58 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Gráfico 3. Deflexiones máximas carril izquierdo (Vuelta)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4. Radios de curvatura carril izquierdo (Vuelta)



Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.3. Análisis de resultados de la evaluación estructural

Luego de calcular y tabular todos los datos de las deflexiones en tramo “Cruce Alto Senac – San Andrés”, se realizará un análisis de ambos carriles a continuación:

4.2.1.3.1 Carril derecho ida

En el carril derecho se obtuvo una deflexión máxima con un valor de $D_c = 61 \times 10^{-2}$ mm que se encuentra en un rango menor al valor máximo de la deflexión admisible que es $D_a = 1,03$ mm lo cual nos indica que el tramo estructuralmente aún tiene recuperación a deflexión, el radio de curvatura promedio del tramo $R_c = 353,4$ m esto significa que tenemos un buen comportamiento estructural del tramo.

4.2.1.3.2 Carril izquierdo vuelta

Para el carril de vuelta se obtuvo una deflexión máxima $D_c = 58 \times 10^{-2}$ mm este valor también se encuentra en un rango menor al valor máximo de la deflexión promedio lo cual nos indica que el tramo estructuralmente aún tiene recuperación a deflexión.

Se puede decir, que la estructura de la vía estudiada se encuentra aún en buenas condiciones, es capaz de soportar las solicitudes de tránsito ya que el promedio de todas las deflexiones esta con un valor por debajo de la deflexión admisible $D_a = 1.03$ mm, el radio de curvatura promedio del tramo es $R_c = 308,7$ m esto significa que tenemos un buen comportamiento estructural del tramo.

4.2.2. Resultados y análisis de resultados de la muestra de suelo

Tabla 54. Calificación según el CBR y uso de suelo

PUNTO CRITICO DONDE SE PRESENTA MAS DETERIORO						
Capa	Espesor	Clasificación	Densidad Max. (gr/cm ³)	Humedad Op. (%)	CBR (%)	Calificación
Base	15	A-1-a	2,23	6,15	38,55	Bueno
Sub-Base	18	A-1-b	2,2	5,95	30,65	Bueno
PUNTO REGULAR A BUENO DE LA CARRETERA						
Base	15	A-1-a	2,26	6,62	52	Excelente
Sub-Base	18	A-1-b	2,27	5,73	61	Excelente

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 55. Resultados de los métodos empleados

Evaluación Superficial		
Método Empleado	Resultado	Observaciones
PCI (Índice de Condición del Pavimento)	54,19	Malo
Índice de Fricción Internacional (IFI)	F60=0,396	F60 < 0,5 Malo (derrapamiento del vehículo)
	Sp=63,20 Km/hr	Media
Círculo de arena (macrotextura)	0,66 mm	Media
Evaluación Estructural		
Viga Benkelman	Do = $59,4 \times 10^{-2}$ mm	Do=0,59 < Da=1.03 mm. (Cumple)
Ida	Rc = 353 m	100 < Rc=331 < 500 (Cumple)
Vuelta	Rc = 309 m	

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 54 - 55 de resultados obtenidos de los ensayos realizados para la evaluación superficial y estructural del tramo Cruce Alto Senac – San Andrés podemos realizar el análisis general del tramo lo cual nos hace conocer que el tramo en estudio según los ensayos de evaluación superficial, necesita una intervención de subsanar las fallas superficiales con un recapado (carpeta asfáltica) según los resultados solo la capa de rodadura sufrió deterioros, mientras que el paquete estructural aún se encuentra en buen estado para soportar el tránsito vehicular, esto según resultados de ensayos de viga Benkelman y CBR de las capas bases.

4.3. Diseño de Carpeta Delgada.

El diseño de la carpeta delgada para el recapamiento del tramo es de 4 cm con esto acreditamos el mejoramiento y alargando la vida útil de la carretera para el tráfico actual y futuro de la región.

Ya que este elemento tiene una gran incidencia en los costos de operación de los vehículos y el presupuesto general del tramo, se hace el estudio de la carpeta asfáltica delgada con un espesor menor o igual a 4,0 Cm.

Para el presente estudio, se tomarán en cuenta los materiales extraídos de la chancadora San Mateo (Garzón).

4.3.1.1.1 Determinación de las Cantidades de Agregados

Se muestra las gráficas de las curvas de las mezclas de bajos espesores, las mismas que cuentan con tamaños máximos de hasta 19 mm (3/4"), de tal manera que cumplen con las exigencias de las carpetas de bajo espesor.

Tomando en cuenta estas recomendaciones, para fines de diseño y colocación en obra, se adopta un espesor de 4cm. con un tamaño máximo de agregado de 12mm., para la mezcla asfáltica a ser diseñada en el tramo de estudio.

La granulometría a ser empleada en el diseño de la carpeta asfáltica delgada para el tramo en estudio es la siguiente:

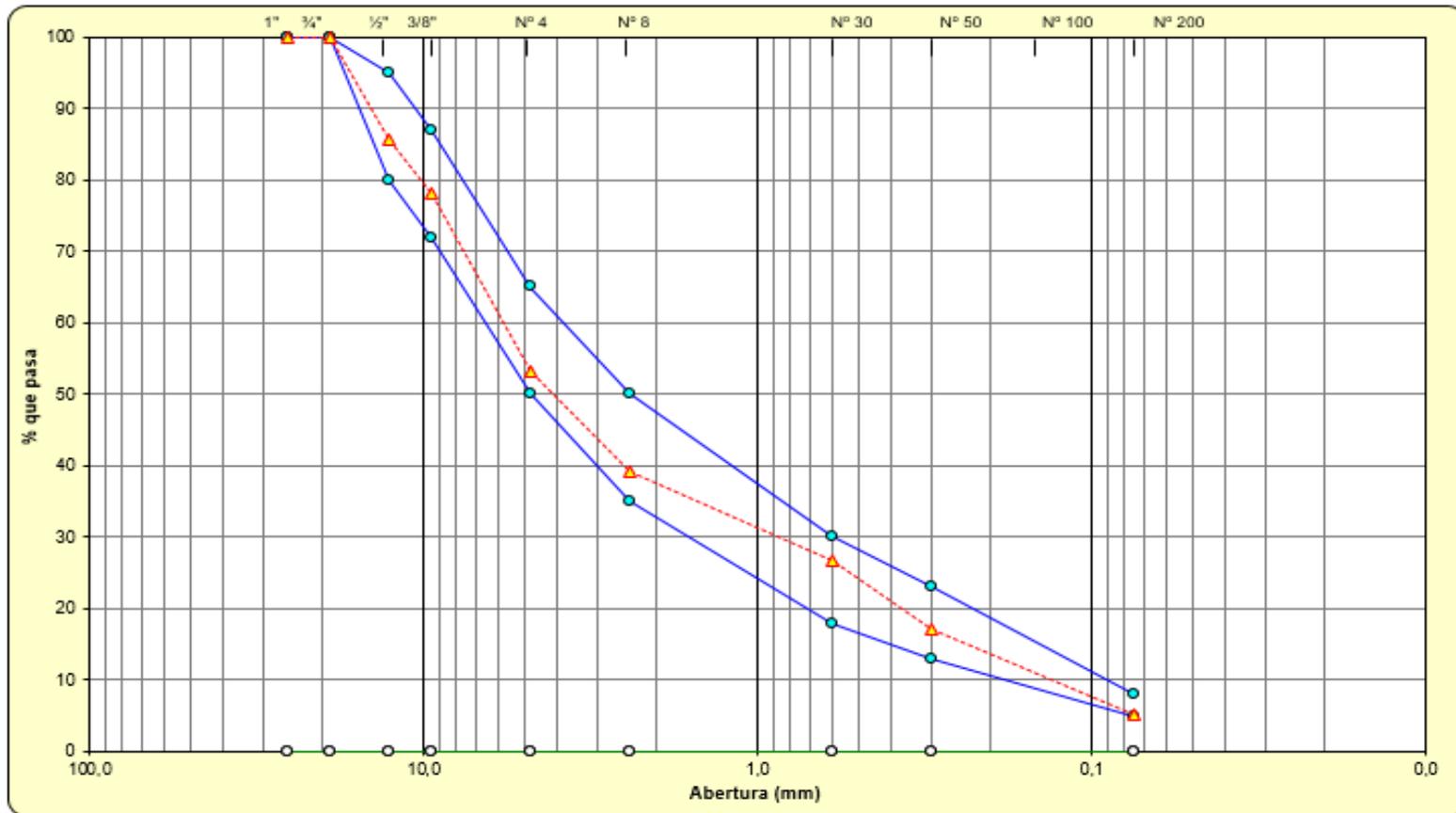
Tabla 56. Agregados para el Diseño del Tramo Vial

Tamices/IRAM N°	m.m.	GRADACIÓN CAC D 12		% PASA AGREGADO
		INFERIOR	SUPERIOR	
(3/4")	19,000	100	100	100,0
(1/2")	12,500	80	95	85,7
(3/8")	9,500	72	87	78,2
(N°4)	4,750	50	65	53,3
(N°8)	2,360	35	50	39,2
(N°30)	0,600	18	30	26,7
(N°50)	0,300	13	23	17,1
(N°200)	0,075	5	8	5,1

Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las gráficas del agregado que fue seleccionado para el diseño de la carpeta asfáltica tomando en cuenta las especificaciones de la C.P.A. (Comisión Permanente del Asfalto-Argentina), en la cual se observa que la curva de diseño se encuentra perfectamente entre las tolerancias especificadas y por lo tanto se procede al diseño de la carpeta delgada E = 4 Cm.

Figura 39. Granulometría para mezclas de carpetas delgadas (CAC D12)



—●— Gradación Inf.

—▲— Gradación Diseño.

—●— Gradación Sup.

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar las dosificaciones de los agregados, se deben tener en cuenta los ensayos previos de los materiales a ser empleados en la mezcla asfáltica, estos ensayos fueron realizados en laboratorios de hormigón de la U.A.J.M.S. y se encuentran detallados en el ANEXOS.

4.3.1.2. Determinación del Cemento Asfáltico Para Carpetas Delgadas

Tomando en cuenta que las Tabla 25 Usos Recomendados de los Asfaltos para Pavimentación y Tabla 26 Penetración Recomendada para Diferentes Tipos de Asfaltos, se determina que se utilizara C.A. de penetración “Tipo 85-100” para el diseño del tramo en estudio.

Una vez determinado el tipo Cemento Asfáltico a utilizarse, se debe evaluar el mismo en laboratorio mediante los ensayos de calidad especificados anteriormente.

4.3.1.2.1 Contenido Mínimo de Cemento Asfáltico

Una mezcla asfáltica antes de ser desarrollada en laboratorio, primeramente, tiene que estar establecido el porcentaje de C.A., para ello se sigue el procedimiento que se indica en la determinación del contenido mínimo, para lo cual existen dos metodologías:

- Método del Área Superficial.
- Método de la Distribución de Agregados.

a). -Método del Área Superficial

Para determinar la cantidad mínima de C.A. empleando este método, se tiene que conocer los siguientes datos de la granulometría realizada al agregado CAC D 12.

Tabla 57. Resumen de % retenido en los tamices

Tamiz IRAM	% Pasa Entre Tamices
3/4"	100,0
1/4"	64,1
# 4	53,3
# 10	37,5
# 40	22,1
# 200	5,1

Fuente: Elaboración propia.

Este procedimiento es aplicable a materiales graduados que contengan cierta cantidad de finos. Primeramente, conociendo la composición granulométrica del material pétreo se calcula el contenido de cemento asfáltico empleando el método que a continuación se indica:

Este método se basa en encontrar el contenido mínimo de C.A. en función a las áreas superficiales de las partículas o sea que, se estima la superficie de los agregados pétreos por cada kilogramo de material. Para hacer dicha estimación, se determinó un área superficial unitaria para cada uno de los tamaños que intervienen en la mezcla, haciendo uso de las siguientes constantes de área en metros cuadrados por kilo de material pétreo, cuyos valores son:

Material pasa malla 1-1/2"	y se retiene en 3/4"	0.27	m ² /kg.	Material
Material pasa malla 3/4"	y se retiene en #4	0.41	m ² /kg.	Material
Material pasa malla #4	y se retiene en #40	2.05	m ² /kg.	Material
Material pasa malla #40	y se retiene en #200	15.38	m ² /kg.	Material
Material pasa malla #200		53.30	m ² /kg.	Material

De acuerdo a los datos de laboratorio se tiene:

Tabla 58. Retenido acumulado

Tamiz IRAM	Coefficiente de Superficie	% Retenido Entre Tamices	$r_i = \frac{C_i * \%Ret.}{100}$
P 1 1/2" - R 3/4"	0,27	0,00	0,000
P 3/4" - R #4	0,41	46,70	0,191
P # 4 - R #40	2,01	31,20	0,627
P # 40 - R #200	15,38	17,00	2,615
Pasa # 200	53,30	5,10	2,718
Sumatoria=			6,151

Fuente: Elaboración propia.

El índice asfalto tiene un valor de 0,0060 que corresponde a gravas angulosas o redondeadas, trituradas de baja absorción. (Tabla 9).

Cálculo del Contenido Mínimo de Cemento Asfáltico.

$$C_{\min} \text{ C.A.} = \text{Sumatoria de } R_i * \text{Índice asfáltico}$$

$$C_{\min} \text{ C.A.} = 0,03691 \text{ Kg C.A./Kg (A)}$$

$$C_{\min} \text{ C.A.} = \mathbf{3,69} \text{ Kg C.A./100 (A)}$$

b). -Método de la Distribución de Agregados.

Para determinar la cantidad mínima de cemento asfáltico CAC D 12. empleando este método, se tienen los siguientes datos de la granulometría realizada en laboratorio:

Tabla 59. Resumen de % retenido en los tamices

Tamiz IRAM	% Pasa Entre Tamices
3/4"	100
1/4"	64,1
# 4	53,3
# 10	37,5
# 40	22,1
# 100	9,4
# 200	5,1

Fuente: Elaboración propia.

Este método tiene por objeto, establecer el contenido mínimo de Cemento Asfáltico (C.A.) en base a la distribución de sus agregados en tres cortes divididos por sus tamices #10 y #200, estableciéndose la siguiente relación:

$$P = 0.020a + 0.045b + cd$$

Donde:

a= Porcentaje de material retenido en la malla #10.

b= Porcentaje de material que pasa la malla #10 y se retiene en la #200.

c= Porcentaje de material que pasa la malla #200.

d=Coefficiente asfáltico que varía con las características del material de acuerdo con los datos de la siguiente tabla:

Tabla 60. Coeficientes asfálticos método de la distribución de partículas.

MATERIAL PÉTREO	ÍNDICE ASFÁLTICO "d"
Gravas y arenas de río o materiales redondeados de baja absorción.	0.15
Gravas trituradas de baja absorción.	0.20
Rocas trituradas de mediana absorción.	0.30
Rocas trituradas de alta absorción.	0.35

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los datos de referencia, se tienen los siguientes valores calculados:

$$a = \% \text{Ret. \#10} = 62,6$$

$$b = \% \text{P\#10-R\#200} = 32,4$$

$$c = \% \text{P \#200} = 5,1$$

d = Índice Asfáltico = 0.20, de acuerdo al tipo de absorción de los agregados.

aplicando la formula correspondiente al contenido de C.A. (P), se tiene:

$$P = 0.020a + 0.045b + cd$$

$$P = 0,020 * 62,6 + 0,045 * 32,4 + 5,1 * 0.20 = 3,73 \text{ Kg C.A./100 Kg (Ag)}$$

El porcentaje total de cemento asfáltico es: $P=3,73 \text{ Kg C.A./100 Kg (Ag)}$

Tomando en cuenta los resultados realizados por los dos métodos, para fines de cálculo se toma en cuenta una cantidad de C.A. mínimo de 4%, valor con el cual se realizará el diseño del contenido Óptimo de C.A. mediante el método de MARSHALL.

$$\mathbf{C_{min} \text{ C.A.} = 4 \text{ Kg C.A./100 Kg (A)}}$$

4.3.1.2.2 Contenido óptimo de cemento asfáltico

Para establecer el contenido óptimo de Cemento Asfáltico en una mezcla asfáltica, se realiza en base al Contenido Mínimo ya determinado, a partir del cual se realizan varios ensayos en laboratorio a fin de establecer el Contenido Óptimo, para ello se tienen varios métodos, pero solamente se tomará en cuenta el método Marshall.

a). - Método Marshall.

De acuerdo a los ensayos determinados en laboratorio, se tienen los siguientes valores:

- Material agregado extraído de la Chancadora San Mateo.
- “Concreto Bituminoso Mezclado en Caliente (C.B.M.C.)” Asfalto del Tipo 85-100.

Tabla 61. Resumen de ensayos de los materiales de la mezcla en laboratorio.

N.º ORDEN	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICADO	PROPUESTO	OBSERVACIONES
01	Cemento Asfáltico 85 -100			
	- Penetración	85 - 100	90,4	AASHTO T-49
	- Ductilidad	> 100	119,7	AASHTO T-51
	- Punto de inflamación	>232	275,0	AASHTO T-48
02	Agregados			
	- Origen		San Mateo	
	- Desgaste en la máquina de Los Angeles	≤ 40 %	24,0 %	AASHTO T-96
	- Durabilidad en Sulfato de Sodio	≤ 12 %		AASHTO T-104
	Agregado Grueso		5,49	
	Agregado Fino		2,63	
	- Caras fracturadas	≥ 75 %	89,2 %	
	- Equivalente de arena	≥ 45 %	83,6 %	AASHTO T-176
			-	
03	Aditivo mejorador de adherencia	-	-	
04	Composición de la Granulometría Tamices IRAM			
	- Tamiz 3/4"(19,00mm)	100	100,0	
	- Tamiz 1/2"(12,50mm)	80 - 95	85,7	
	- Tamiz 3/8"(9,50mm)	72 - 87	78,2	
	- Tamiz N° 4(4,75mm)	50 - 65	53,3	
	- Tamiz N° 8(2,36mm)	35 - 50	39,2	
	- Tamiz N° 30(0,60mm)	18 - 30	26,7	
	- Tamiz N° 50(0,30mm)	13 - 23	17,1	

	- Tamiz N° 200(0,075mm)	5 - 8	5,1	
05	Porcentaje de asfalto	4.5 - 9.0	5,05	Variación ± 0.3
06	Características del Diseño Marshall			
	- Estabilidad (Lbs.)	≥ 1500 Lbs.	5136	75 golpes por cara
	- Fluencia (1 / 100")	8 - 18	13,0	
	- Porcentaje de vacíos	3 - 5	3,71	
	- Densidad (Kg/dm ³)	-	2,33	
	- Relación Bitumen Vacíos R.B.V. (%)	75 - 82	76,33	
	- Resistencia Remanente (%)	≥ 85 %	88,7%	
07	Temperaturas (°C)			
	- Temperatura de mezcla en planta	-	146 - 152	
	- Temperatura de compactación	-	134 - 138.5	

Fuente: Elaboración propia.

Se determinó los porcentajes de agregado grueso, intermedia, arena triturada y arena natural lo cual se detalla seguidamente:

Tabla 62. Resumen de ensayos de los materiales de la mezcla en laboratorio.

AGREGADO →		GRAVA 1"		INTERMEDIA 1/2"		ARENA TRITURADA 3/8"		ARENA NATURAL		CURVA DE TRABAJO	FAJA		
		25%		25%		45%		5%					
% USADA →		TAMICES		% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.	ESPECIF. ESPECIALES	TOLERANCIAS
		PULG.	m.m.										
1	25,40	100,0	25,0	100,0	25,0	100,0	45,0	100,0	5,0	100,0	100 - 100	± 7	
3/4	19,05	100,0	25,0	100,0	25,0	100,0	45,0	100,0	5,0	100,0	100 - 100	± 7	
1/2	12,70	42,9	10,7	99,9	25,0	100,0	45,0	100,0	5,0	85,7	80 - 95	± 7	
3/8	9,50	17,6	4,4	95,1	23,8	100,0	45,0	100,0	5,0	78,2	72 - 87	± 7	
N°4	4,80	0,3	0,1	24,4	6,1	93,6	42,1	99,6	5,0	53,3	50 - 65	± 5	
N°8	2,40	0,2	0,0	1,8	0,5	74,9	33,7	99,1	5,0	39,2	35 - 50	± 5	
N°30	0,60	0,1	0,0	0,8	0,2	49,7	22,4	82,1	4,1	26,7	18 - 30	± 5	
N°50	0,30	0,1	0,0	0,7	0,2	32,7	14,7	42,8	2,1	17,1	13 - 23	± 5	
N°100	0,15	0,1	0,0	0,6	0,2	19,2	8,6	11,6	0,6	9,4	9 - 16	± 5	
N°200	0,08	0,1	0,0	0,5	0,1	10,5	4,7	3,7	0,2	5,1	5 - 8	± 2	

Fuente: Elaboración propia.

Del cuadro anterior se puede deducir que en la composición de la mezcla asfáltica de bajo espesor, tendrá una cantidad de 25% de agregado grueso de 1", 25% de agregado intermedio de 1/2", 45% de arena triturada de 3/8" y el 5% de arena natural; es decir que con estas proporciones se realizara la mezcla asfáltica tomando en cuenta el porcentaje de C.A. a ser determinado mediante el ensayo Marshall a ser determinado en el siguiente cuadro, el cual partió de un contenido mínimo de C.A. de **4 Kg C.A./100 Kg (Ag)**.

Tabla 63. Metodo Marshall para contenido optimo de cemento asfáltico

**PLANILLA MÉTODO MARSHALL
PARA EL CONTENIDO ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO**

Granulometría Formada			P. Especifico			% agregado		
Mat. Retenido Tamiz N° 4			2,659			46,7		
Mat. Pasa Tamiz N° 4			2,606			53,3		
Peso Especifico Total			2,632			100		

TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO: CONVENCIONAL		85/100
NÚMERO DE GOLPES POR CARA		75
TEMPERATURA DE MEZCLADO (°C)		160
PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-229 (gr/cm ³)		1,0000

Agregado		%
Grava		25
Gravilla		25
Arena Triturada		45
Arena Fina		5

N° de probeta	% de Asfalto		altura de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.		cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg
1	4,00	4,17	6,67	1174,7	1177,0	655	522,0	2,25	2,259	2,46	8,33	17,37	52,02	1000	2674,58	0,93	2487,36	2779,69	11	11,33
2			6,55	1186,4	1188,6	665	523,6	2,27						1151	3081,19	0,95	2934,83		11	
3			6,55	1182,4	1186,0	663	523,0	2,26						1144	3062,34	0,95	2916,88		12	
4	4,50	4,71	6,57	1179,4	1181,3	667	514,3	2,29	2,298	2,44	5,99	16,33	63,32	1850	4963,46	0,95	4709,33	4567,3	13	12,00
5			6,61	1180,0	1182,6	669	513,6	2,30						1650	4424,90	0,94	4165,16		11	
6			6,58	1176,9	1179,2	668	511,2	2,30						1900	5098,10	0,95	4827,39		12	
7	5,00	5,26	6,48	1184,5	1185,6	676	509,6	2,32	2,329	2,42	3,90	15,55	74,91	1700	4559,54	0,97	4411,35	5158,22	13	13,00
8			6,38	1180,4	1181,9	678	503,9	2,34						2350	6309,86	0,99	6262,53		12	
9			6,46	1179,0	1180,0	672	508,0	2,32						1840	4936,53	0,97	4800,78		14	
10	5,50	5,82	6,55	1188,6	1192,0	682	510,0	2,33	2,347	2,40	2,34	15,25	84,65	1700	4559,54	0,95	4342,96	4586,3	14	14,00
11			6,42	1190,6	1192,2	687	505,2	2,36						1650	4424,90	0,98	4347,46		13	
12			6,53	1184,8	1186,1	683	503,1	2,35						1975	5300,06	0,96	5068,45		15	
13	6,00	6,38	6,47	1188,8	1190,8	683	507,8	2,34	2,3535	2,38	1,27	15,39	91,77	1204	3222,56	0,97	3125,89	3136,5	15	15,33
14			6,44	1198,6	1199,8	691	508,8	2,36						1170	3132,35	0,98	3061,88		15	
15			6,46	1197,7	1198,7	692	506,7	2,36						1237	3312,77	0,97	3221,67		16	
16	6,50	6,95	6,45	1182,5	1183,5	675	508,5	2,33	2,3419	2,36	0,93	16,15	94,25	1090	2916,93	0,98	2844,01	2860,3	17	17,00
17			6,42	1203,1	1203,3	694	509,3	2,36						1100	2943,86	0,98	2892,34		18	
18			6,34	1166,6	1167,0	668	499,0	2,34						1060	2836,15	1,00	2844,66		16	
ESPECIFICACIONES			mínimo						3	13	75						1800		8	
			máximo						5	-	82						-		18	

Seguidamente se detallan las siguientes relaciones establecidas por el método MARSHALL.

RESUMEN DE FORMULAS DE DISEÑO “MÉTODO MARSHALL”

$$G_{ag} = \frac{100}{\frac{\%AG}{G_{bAC}} + \frac{\%AF}{G_{bAF}} + \frac{\%F}{G_{bF}}}$$

$$(1) D_{mt} = \frac{100}{\frac{\%C.A.}{GCA} + \frac{\%C.A.}{G_{ag}}}$$

$$(2) \%V_m = \frac{D_{mt} - D_{rm}}{D_{mt}} \times 100$$

$$(3) \%V_{ag} = \%V_m + \frac{\%CA \times D_{rm}}{GCA}$$

$$(4) \%VCA = \frac{\%V_{ag} - \%V_m}{\%V_{ag}} \times 100$$

De estas ecuaciones se ilustran seguidamente los cuadros de resultados de los ensayos de Densidad, Estabilidad, % de vacíos, Fluencia y la cantidad de vacíos ocupados por el asfalto, de las cuales se determinará el contenido óptimo de Cemento Asfáltico (C.A.).

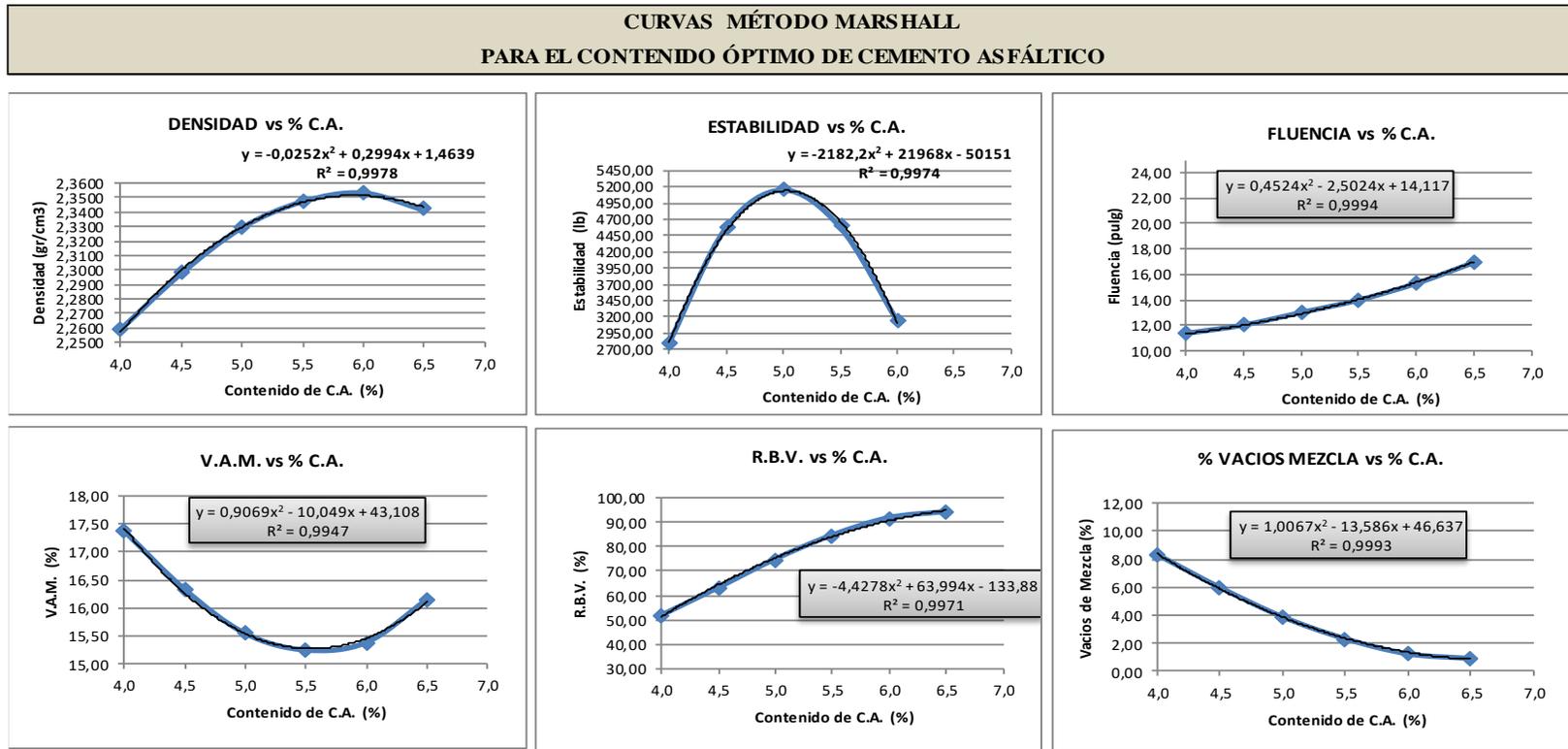
Tabla 64. Resumen de resultados de diseño “método Marshall”

PORCENTAJES DE CEMENTO ASFÁLTICO	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
4,0	2,2590	2779,69	11,33	8,33	52,02	17,37
4,5	2,2977	4567,29	12,00	5,99	63,32	16,33
5,0	2,3293	5158,22	13,00	3,90	74,91	15,55
5,5	2,3474	4586,29	14,00	2,34	84,65	15,25
6,0	2,3535	3136,48	15,33	1,27	91,77	15,39
6,5	2,3419	2860,33	17,00	0,93	94,25	16,15

Fuente: Elaboración propia.

La metodología de diseño del “MÉTODO MARSHALL” se detalla en el ANEXO.

Tabla 65. Graficas de diseño de mezclas asfálticas (método Marshall).



	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO	Estabilidad Marshall (Lb)	5136,44	5,03
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,35	5,94
	Vacios de la mezcla (%)	4,00	4,17
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (% =	5,05

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al ensayo del MÉTODO MARSHALL, se determina que el contenido Óptimo de Cemento Asfáltico es de **5,05 Kg C.A./100Kg (Ag)**.

Para determinar el contenido óptimo de Cemento Asfáltico (C.A.), se tiene que promediar los valores óptimos de las gráficas con el siguiente criterio:

El contenido de C.A. correspondiente al mayor (máximo) peso volumétrico.

El contenido de C.A. correspondiente a la máxima estabilidad.

Para determinar el Contenido de C.A. para las gráficas de % Huecos Ocupados por el C.A. y para la gráfica de % vacíos, se emplea los criterios de la Tabla 12 Especificaciones para mezclas asfálticas, el cual establece que:

El contenido de C.A. correspondiente al valor medio del porcentaje de vacíos señalados se encuentra en el rango de 3 a 5, teniendo un valor medio de 4.

El contenido de C.A. correspondiente al valor promedio del porcentaje de huecos ocupados por el C.A., se encuentra entre los valores de 75 a 85, teniendo un valor medio de 80%.

De acuerdo con estos parámetros, se tienen los valores promedios de las gráficas,

El contenido de C.A. correspondiente al valor medio del porcentaje de vacíos señalados en la Tabla 12. Especificaciones para mezclas asfálticas.

El contenido de C.A. correspondiente al valor promedio del porcentaje C.A. de las gráficas se tiene un contenido óptimo de:

C. Opt. C.A.= 5,05 Kg C.A./100 Kg (A)

Tabla 66 Valores de las propiedades marshall con el contenido óptimo de cemento asfáltico

PROPIEDADES MARSHALL	VALOR
Estabilidad (Lb)	5135,982
Fluencia (0,01 pulg)	13,013
Densidad (gr/cm ³)	2,333
Vacíos mezcla (%)	3,708
V.A.M. (%)	15,491
R.B.V. (%)	76,331

Fuente: Elaboración propia

Tabla 67 Planilla de ensayos con el contenido optimo método marshall

**PLANILLA MÉTODO MARSHALL
CON EL ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO**

Granulometría Formada	P. Específico	% agregado
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,659	46,7
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,606	53,3
Peso Específico Total	2,632	100

TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO: CONVENCIONAL	85/100
NÚMERO DE GOLPES POR CARA	75
TEMPERATURA DE MEZCLADO (°C)	160
PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-229 (gr/cm ³)	1,0000

Agregado	%
Grava	25
Gravilla	25
Arena Triturada	45
Arena Fina	5

N° de probeta	% de Asfalto		altura de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia		
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.		cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg
1	5,05	5,32	6,54	1200,2	1203,9	688	515,9	2,33	2,326	2,42	3,94	15,69	74,90	1480	3967,12	0,95	3786,22	3786,22	15	15,00
2			6,43	1182,1	1186,4	679	507,4	2,33	2,330	2,42	3,80	15,57	75,58	1030	2755,36	0,98	2700,26	2700,26	13	13,00
3			6,50	1179,3	1183,2	676	507,2	2,33	2,325	2,42	3,99	15,73	74,63	1400	3751,70	0,97	3620,39	3620,39	14	14,00
4			6,55	1187,6	1193,0	681,5	511,5	2,32	2,322	2,42	4,13	15,85	73,96	1450	3886,34	0,95	3709,12	3709,12	13	13,00
5			6,42	1184,7	1186,7	681	505,7	2,34	2,343	2,42	3,27	15,10	78,37	1500	4020,98	0,99	3960,66	3960,66	14	14,00
6			6,48	1187,1	1189,2	676	513,2	2,31	2,313	2,42	4,49	16,17	72,25	1810	4855,75	0,97	4697,93	4697,93	16	16,00
7			6,53	1190,8	1193,8	677	516,8	2,30	2,304	2,42	4,86	16,49	70,55	1400	3751,70	0,96	3587,75	3587,75	12	12,00
8			6,45	1183,9	1188,4	671	517,4	2,29	2,288	2,42	5,52	17,07	67,68	1610	4317,19	0,98	4209,26	4209,26	14	14,00
9			6,50	1178,0	1184,2	674	510,2	2,31	2,309	2,42	4,66	16,32	71,44	1380	3697,84	0,97	3568,42	3568,42	15	15,00
10			6,43	1179,2	1183,0	673	510,0	2,31	2,312	2,42	4,53	16,20	72,06	1620	4344,11	0,98	4257,23	4257,23	14	14,00
11			6,54	1186,5	1191,0	687	504,0	2,35	2,354	2,42	2,79	14,68	80,98	1410	3778,63	0,95	3606,32	3606,32	13	13,00
12			6,52	1198,6	1201,3	674	527,3	2,27	2,273	2,42	6,14	17,62	65,15	1470	3940,19	0,96	3782,59	3782,59	14	14,00
13			6,50	1185,0	1189,0	668	521,0	2,27	2,274	2,42	6,08	17,57	65,38	1210	3240,07	0,97	3126,66	3126,66	14	14,00
14			6,55	1175,5	1183,4	673	510,4	2,30	2,303	2,42	4,90	16,53	70,35	1400	3751,70	0,95	3580,62	3580,62	13	13,00
15			6,55	1187,5	1191,9	674	517,9	2,29	2,293	2,42	5,32	16,90	68,51	1430	3832,48	0,95	3657,72	3657,72	13	13,00
16			6,42	1184,2	1186,3	685	501,3	2,36	2,362	2,42	2,46	14,39	82,91	1400	3751,70	0,99	3695,42	3695,42	12	12,00
17			6,57	1189,7	1193,0	676	517,0	2,30	2,301	2,42	4,98	16,60	70,00	1060	2836,15	0,95	2690,94	2690,94	9	9,00
18			6,62	1185,3	1191,7	675	516,7	2,29	2,294	2,42	5,28	16,86	68,70	1450	3886,34	0,94	3658,21	3658,21	12	12,00
19			6,55	1198,5	1201,8	687	514,8	2,33	2,328	2,42	3,87	15,63	75,24	1220	3266,99	0,95	3111,81	3111,81	10	10,00
20			6,59	1182,7	1187,0	672	515,0	2,30	2,297	2,42	5,17	16,77	69,15	1020	2728,43	0,95	2583,55	2583,55	12	12,00
21			6,62	1190,1	1195,5	679	516,5	2,30	2,304	2,42	4,86	16,49	70,55	1180	3159,28	0,94	2967,83	2967,83	10	10,00
22			6,49	1188,3	1190,4	676	514,4	2,31	2,310	2,42	4,61	16,28	71,66	1110	2970,79	0,97	2874,24	2874,24	10	10,00

23			6,49	1194,3	1197,0	685	512,0	2,33	2,333	2,42	3,68	15,46	76,19	1580	4236,40	0,97	4088,13	4088,13	13	13,00
24			6,49	1170,6	1174,0	664	510,0	2,30	2,295	2,42	5,22	16,81	68,94	1430	3832,48	0,97	3707,93	3707,93	14	14,00
25			6,51	1179,6	1182,3	676	506,3	2,33	2,330	2,42	3,80	15,56	75,60	1410	3778,63	0,96	3636,93	3636,93	13	13,00
26			6,56	1177,5	1181,4	666	515,4	2,28	2,285	2,42	5,66	17,20	67,07	1380	3697,84	0,95	3515,54	3515,54	14	14,00
27			6,61	1171,7	1177,5	663	514,5	2,28	2,277	2,42	5,96	17,46	65,85	1010	2701,51	0,94	2542,93	2542,93	13	13,00
28			6,44	1191,0	1192,5	687	505,5	2,36	2,356	2,42	2,71	14,61	81,43	1858	4985,00	0,98	4885,30	4885,30	15	15,00
29			6,50	1181,5	1184,6	672	512,6	2,30	2,305	2,42	4,83	16,47	70,69	1710	4586,47	0,96	4414,47	4414,47	12	12,00
30			6,52	1182,2	1184,9	676,5	508,4	2,33	2,325	2,42	3,98	15,73	74,67	1635	4384,51	0,96	4209,13	4209,13	13	13,00
ESPECIFICACIONES			mínimo									3	13	75	1800				8	
			máximo									5	-	82	-				18	

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta la composición de los porcentajes de los agregados que serán tomados en cuenta para la mezcla asfáltica de bajo espesor, se tienen las siguientes cantidades:

Tabla 68. Composición de agregado

GRAVA 1"	25,00%
INTERM. 1/2"	25,00%
ARENA 3/8"	45,00%
ARENA NAT.	5,00%
TOTAL	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 69. Composición de la mezcla asfáltica de bajo espesor.

GRAVA 1"	23,74%
INTERM. 1/2"	23,74%
ARENA 3/8"	42,73%
ARENA NAT.	4,74%
% ASF. OPT.	5,05%
TOTAL	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

Resumen de las cantidades de materiales a ser empleados en las carpetas de bajo espesor

a) Mezclas de agregados

Grava de 1": 25,0%

Grava intermedia 1/2": 25,0%

Arena 3/8": 45,0%

Arena Natural: 5,0%

Total: 100%

b) Mezclas de agregado- asfalto

Total, de Agregado: 94.95%

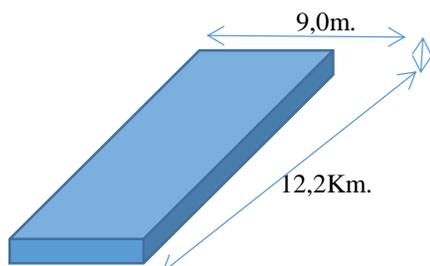
Cemento Asfáltico: 5.05%

TOTAL: 100%

c) Mezcla total

Grava de 1": 25%	0.9495	23,74%
Grava intermedia 1/2": 25%	0.9495	23,74%
Arena 3/8": 45%	0.9495	42,73%
Arena Natural: 5%	0.9495	4.74%
Cemento Asfáltico:		5.05%
TOTAL:		100%

d). -Volúmenes del tramo vial en estudio carpeta delgada E=4Cm.



E=4Cm.

Volumen Tramo:	4.392,00	m ³
Incremento por Sobreancho:	9,60	m ³
TOTAL VOLUMEN DEL TRAMO:	4.401,60	m³

Tabla 70. Volúmenes de agregado asfalto

% DE ASFALTO-AGREGADO				VOLÚMENES	
				TOTAL, m ³	m ³ /m ²
Grava de 1":	25%	0,9495	23,74%	1044,830	0,0095
Grava intermedia 1/2":	25%	0,9495	23,74%	1044,830	0,0095
Arena 3/8":	45%	0,9495	42,73%	1880,694	0,0171
Arena Natural:	5%	0,9495	4,75%	208,966	0,0019
Cemento Asfáltico:			5,05%	222,281	0,00202
TOTAL:				4401,60	0,0400

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 71. Cuadro resumen de carpeta delgada E= 4 Cm

Unidad	m ³	Kg.	Litros	%
Cantidad de Agregado:	4.179,32	4.179.319,20	-	94,95
Cantidad de Asfalto:	222,28	-	222.280,80	5,05
TOTAL:	4.401,60	4.179.319,20	222.280,80	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 72. Resumen de insumos por m² de carpeta asfáltica E= 4 Cm

Descripción	Unidad	Cantidad
Grava de 1":	kg	0,0095
Grava intermedia 1/2":	kg	0,0095
Arena 3/8":	kg	0,0171
Arena Natural:	kg	0,0019
Cemento Asfáltico:	Lt	2,0200

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Aplicación de carpeta delgada E=4 cm

Para la ejecución de carpetas delgadas en el tramo en estudio, se debe considerar que para la fabricación de esta mezcla en caliente se lo realiza en plantas estacionarias, por lo que estas están sometidas al control en laboratorio por diferentes ensayos de agregado-asfalto de acuerdo a las especificaciones técnicas establecidas por normas vigentes.

Para que esta mezcla asfáltica sea puesta en la capa de rodadura de la carretera, se lo debe transportar en equipo de acarreo hasta este lugar en donde será colocada tomando en cuenta que esta mezcla conserve su temperatura hasta ser puesta en la capa de rodadura de la carretera, para lo cual se debe incorporar esta mezcla a una terminadora que nos posibilita extender la mezcla en el pavimento de acuerdo a un determinado espesor que en este caso es de 4,0 Cm.

Para la elaboración de la mezcla en caliente para este estudio, se considera que el D.A.V., cuenta con una planta de producción de mezclas asfálticas en la Comunidad de Chocloca municipio de 1^a Sección de la Provincia Avilés del Departamento de Tarija, distante a 46 Km., (1 Hora de transporte) de la zona del proyecto, por lo que se deberá transportar la mezcla asfáltica desde este punto de producción y al mismo tiempo se deberá tomar en cuenta los recaudos correspondientes para que la mezcla asfáltica pueda conservar la temperatura de fabricación en el momento de ser trasladada y colocada en el tramo vial en estudio.

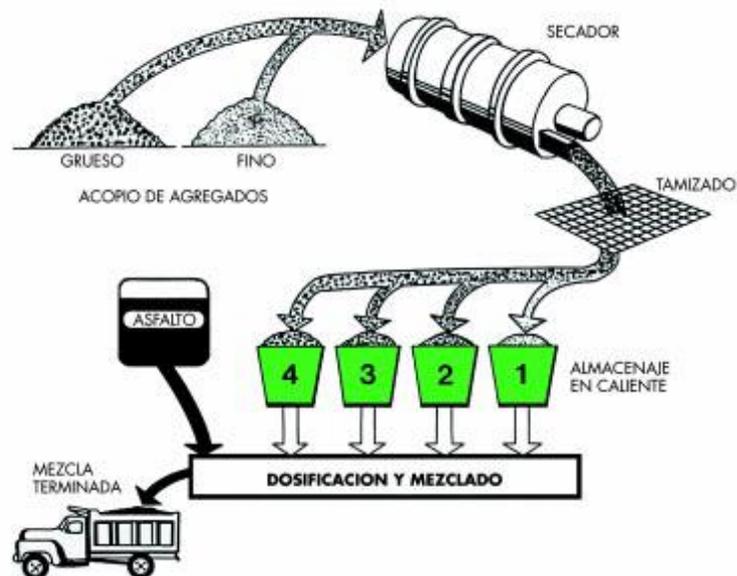
La mezcla asfáltica de bajos espesores en este caso la carpeta delgada de espesor de E=4Cm., será producida mediante la mezcla en planta de agregado del tipo CAC-D12

descrito anteriormente con la aplicación de Cemento Asfáltico Diluido TIPO 85-100, en las cantidades descritas anteriormente.

El equipo mínimo para la ejecución de mezclas en caliente, es el siguiente: Depósito para cemento asfáltico equipado con una bomba de circulación, que garantice un flujo continuo al mezclador durante todo el proceso de mezclado. Se debe calentar el cemento asfáltico a las temperaturas fijadas, para lo cual tiene que contar con serpentines de aceite, vapor o electricidad o cualquier otro medio que no implique el contacto de fuego directo con las paredes del depósito. Todas las cañerías y estanques deberán estar dotados de capas aislantes, a fin de evitar pérdidas de calor y quemaduras del personal de obra.

Una planta mezcladora en caliente equipada con un sistema para calentar, secar y llevar el árido a la temperatura de mezclado; con unidades clasificadoras para separar el agregado y permitir su óptima dosificación; y con una unidad de mezcla, que recibe el cemento asfáltico y los áridos perfectamente dosificados y a la temperatura recomendada como se ilustra en la figura.

Figura 40. Esquema de una planta asfáltica en caliente



Fuente: Imagen web.

Los vehículos de alto tonelaje (Volquetes) para el transporte de mezcla en caliente, encarpados para evitar que disminuya la temperatura de la mezcla hasta ser colocada en la vía del estudio.

Una vez transportada la mezcla asfáltica al tramo vial, se procede a esparcir la mezcla en el carril de la carretera con el espesor especificado $E = 4$ Cm, mediante el equipo Finisher autopropulsada –terminadora y de esa manera conformar una mezcla nivelada, según las cotas establecidas, la misma que debe poseer marchas hacia adelante y atrás, además de estar equipada con alisadores, vibradores y dispositivos de calentamiento que permitan obtener la temperatura exigida para la colocación de la mezcla sin irregularidades.

Seguidamente se debe realizar el aplanado con equipo de compactación constituido por rodillos neumáticos y rodillos lisos tipo tándem o rodillos vibratorios, los cuales deben tener una carga de 8 a 15 toneladas, por su parte los rodillos neumáticos autopropulsados, deben estar dotados de neumáticos que permitan una presión de 35 a 120 libras por pulgada cuadrada, con un peso variable entre 5 y 35 toneladas.

En los rodillos vibratorios es necesario ajustar la frecuencia y amplitud de compactación al espesor de la capa a compactar, fijando una velocidad apropiada y avanzando siempre en el sentido de giro de la excéntrica.

4.3.3. Costo de carpetas delgadas

Para determinar el costo de la carpeta delgada que será empleada en el tramo vial en estudio, se tomara en cuenta los siguientes ítems y costos que corresponden solamente a la capa de rodadura, los cuales son:

Tabla 73. Presupuesto de carpeta de bajo espesor $E=4$ Cm

Nº Ítem	Descripción Ítem	Unidad	CANTIDAD	P.U. (Bs)	Costo Parcial (Bs.)
1,00	Transporte de Mezcla Asfáltica	m ³ /Km.	180.025,60	3,78	680.496,77
2,00	Provisión y Colocado de Carpeta Asfáltica E=4Cm.	m ²	97.840,00	61,00	5.968.240,00
TOTAL (Bs.):					6.648.736,77

Son: Seis Millón(es) Seiscientos Cuarenta y Ocho Mil Setecientos Treinta y Seis con 77/100 bolivianos.

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera se detallan los costos de materiales, mano de obra y equipo, lo cual se muestra seguidamente.

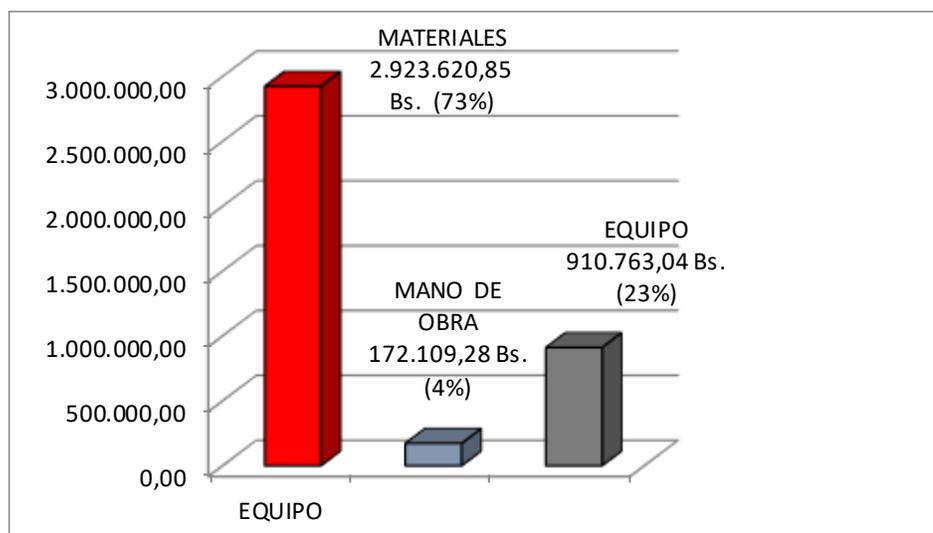
Tabla 74. Presupuesto de materiales, mano de obra y equipo E = 4 Cm

N ^a Ítem	Descripción Ítem	MATERIALES	MANO DE OBRA	EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA
1,00	Transporte de Mezcla Asfáltica	0	15.290,88	260.900,64
2,00	Provisión y Colocado de Carpeta Asfáltica E=4Cm.	2.923.620,85	156.818,40	649.862,40
TOTAL:		2.923.620,85	172.109,28	910.763,04

Fuente: Elaboración propia.

De estos resultados se hace un análisis grafico de los costos de materiales, mano de obra y equipo que será empleado para realizar la ejecución de la capa de rodadura empleando la carpeta asfáltica delgada con espesor de E = 4 Cm.

Figura 41. Presupuesto de materiales, mano de obra y equipo E = 4 cm



Fuente: Elaboración propia.

Se muestra en la gráfica los porcentajes en costo de materiales (73%), mano de obra (4%) y equipo (23%), con los cuales se ejecuta la capa de rodadura correspondiente a la carpeta de bajo espesor que se construirá en el tramo vial “Cruce Alto Senac – San Andrés”.

Para determinar los costos de la carpeta asfáltica delgada, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros al momento de elaborar los precios unitarios:

- Cargas Sociales: 55%
- Herramientas Menores: 5%
- Gastos Generales y administrativos: 10%
- Utilidad: 10%
- Impuestos al valor Agregado: 14,94%
- Impuesto a las Transacciones: 3,09%

Estos valores son extraídos de los parámetros especificados de acuerdo a lo establecido por Impuestos Nacionales y el **MINISTERIO DE ECONOMÍA Y FINANZAS PÚBLICAS-DIRECCIÓN GENERAL DE NORMAS DE GESTIÓN PÚBLICA-BOLIVIA**.

4.3.4. Resultados del costo de la carpeta asfáltica

La ejecución de carpetas asfálticas de bajo espesor E=4Cm., específicamente para el Tramo Vial “Cruce Alto Senac – San Andrés”, se realizará desde tres puntos de vista: costos de los materiales, costos de mano de obra y de maquinaria-equipos.

Seguidamente se muestra un detalle de los costos totales de carpetas delgadas.

Tabla 75. Presupuesto total de la capa de rodadura para el tramo vial en estudio

Nº	Descripción Capa de Rodadura	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs)	Costo (Bs.)
1,00	Costo Carpeta Delgada E=4Cm.	Glb	1,00	6.648.736,77	6.648.736,77

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 76. Costo de materiales para carpeta delgada

Nº	Descripción insumos	Und.	Cant.	Unit.	Parcial (Bs)
1	ARENA DE 3/8"	m ³	1880,69	120,00	225.682,80
2	ARENA NATURAL	m ³	208,97	110,00	22.986,70
3	CEMENTO ASFÁLTICO 85-100	Lt	222280	11,00	2.445.080,00
4	GRAVA 1"	m ³	1044,83	110,00	114.931,30
5	GRAVA INTERMEDIA 1/2"	m ³	1044,83	110,00	114.931,30
	Total:				2.923.611,80

Fuente: Elaboración propia.

4.3.5. Costo de recapados estudiado por otros autores

Tabla 77. Presupuesto de la capa de rodadura tratamiento triple por Km

Nº	Descripción Capa de Rodadura	P.U. (Bs)	Longitud del tramo (Km)	Costo (Bs./Km)
2	Costo Tratamiento Superficial Triple E=2,5Cm.	4.306.022,63	4,80	897.088,05

Fuente: (Vega, 2013).

Tabla 78. Presupuesto de recapado de pavimento flexible.

Nº	Descripción Capa de Rodadura	P.U. (Bs)	Longitud del tramo (Km)	Costo (Bs./Km)
1	Costo Recapado de Pavimento Flexible E=3Cm.	4.809.531,60	5,82	826.380

Fuente: (Camacho, 2021).

Tabla 79. Presupuesto de recapamientos.

Nº	Descripción Capa de Rodadura	P.U. (Bs)	Longitud del tramo (Km)	Costo (Bs./Km)
1	Refuerzo de Hormigón Simple E=3,68Cm	3.463.684,40	5	692.736,88

Fuente: (Cuevas, 2016).

4.4. Prueba de hipótesis

Una vez estudiado el costo de la carpeta delgada, analizaremos la alternativa estudiada para el tramo y la compararemos con otras alternativas de carpetas asfálticas de mejoramiento o refuerzo que fueron estudiadas por otros autores, que normalmente se ejecuta en nuestras carreteras se hará un análisis de estas alternativas técnica y económicamente.

a). -Análisis Técnico. - Tomando en cuenta las carpetas delgadas de bajo espesor o carpetas delgadas, se puede hacer referencia de que las mismas tienen una durabilidad mayor que los tratamientos superficiales y cuentan con un control de calidad en la elaboración de la mezcla porque es diseñada y elaborada en planta, bajo el estricto control tecnológico de un laboratorio. Tanto el agregado como el asfalto son materiales que deben ser controlados bajo especificaciones técnicas pertinentes para que se obtenga una buena carpeta asfáltica.

Referente a las otras alternativas, estos debido a que su construcción es en situ, requiere de un control tecnológico estricto en el campo, para lo cual se debe emplear un despliegue considerable de equipo multidisciplinario de tal manera de lograr los propósitos propuestos y obtener buenas carpetas superficiales, debe ser construido tomando en cuenta todos los factores climatológicos existentes en la zona, considerar la limpieza de los agregados, las temperaturas y tasas de riego del asfalto, las tasas de riego del agregado, etc., para lo cual se debe tener en cuenta que se debe emplear equipo con las mejores condiciones posibles.

Por otra parte, las carpetas asfálticas delgadas tienen un espesor $E = 4$ Cm., para el tramo vial en estudio, lo cual hace de que sea de mayor espesor que las otras alternativas con espesores menores a la propuesta en esta tesis, esto repercute en que la carpeta delgada cuenta con las condiciones más adecuadas para el tramo en estudio.

b). -Análisis Económico. - Anteriormente se realizó la comparación técnica de las alternativas para capas de rodadura teniendo en cuenta que las mismas tienen costos diferentes y que la capa de rodadura más económica es la carpeta asfáltica de bajo espesor.

Seguidamente se hace referencia de los resultados de los costos obtenidos para la capa de rodadura “carpeta delgada” y comparándola con otras alternativas ya estudiadas en otras tesis, aremos una relación de costos por kilómetro de carretera.

Tabla 80. Presupuesto total de capas de rodadura por Km.

Nº	Descripción Capa de Rodadura	P.U. (Bs)	Longitud del tramo (Km)	Costo (Bs./Km)
1	Costo Carpeta Delgada E=4Cm.	6.648.736,77	12,20	544.978,42
2	Costo Tratamiento Superficial Triple E=2,5Cm.	4.306.022,63	4,80	897.088,05
3	Recapado de pavimento flexible de E=3 cm	4809531,60	5,82	826.380,00
4	Refuerzo de Hormigón Simple E=3,68Cm	3.463.684,40	5.00	692.736,88

Fuente: Elaboración propia.

Tomando en cuenta el cuadro anterior, se puede observar que el costo de Carpeta Delgada $E = 4$ Cm es de **544.978,42 Bs/Km.**, de lo cual se toma en cuenta que para el tramo vial Asfaltado Cruce Alto Senac – San Andrés, la alternativa de menor costo es la ejecución de la capa de rodadura correspondiente a la Carpeta de bajo espesor denominada carpeta delgada E=4Cm.

c). Análisis social y ambiental

En tema social los beneficiarios estarían muy conformes con el recapamiento siendo esto una prioridad que vienen pidiendo año tras año a las autoridades de turno, no se

opondrían a este proyecto de recapamiento y en tema ambiental no habría un daño de impacto porque se cuentan con grandes canteras de áridos en los ríos que se encuentran cerca del tramo como ser en el Rio Pinos y El Rio de Sola o también llamado Rio Bellavista.

4.5. Alternativa más óptima

De acuerdo al análisis técnico económico realizado anteriormente, se toma en cuenta como capa de rodadura para el tramo vial Asfaltado Cruce Alto Senac – San Andrés como una alternativa técnico económico más óptima a la siguiente capa de rodadura:

- **Carpeta de Bajo Espesor o Carpeta Delgada E = 4Cm.**

Esta alternativa es la más económica y tiene un costo de **6.648.736,77 Bs.**, lo cual hace una relación de **544.978,42 Bs/Km.** Esto quiere decir que la carpeta delgada estudiada para el recapamiento del tramo en estudio es la más adecuada.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se realizó con éxito la evaluación del estado superficial y estructural del pavimento flexible del tramo Cruce Alto Senac – San Andrés y se determinó el estado actual de funcionamiento del tramo en estudio. Con lo cual se planteó una alternativa de solución.
- Se debe hacer notar la gran importancia que tienen los sistemas de evaluación y mantenimiento rutinarios en las vías, ya que estos ayudan a prevenir y mantener nuestras vías en buen estado y así lograr que estas cumplan su ciclo de vida útil, ofreciendo al usuario comodidad, confort y seguridad en su desplazamiento por las mismas evitando elevados gastos en la rehabilitación o llegando al extremo a la reconstrucción.
- Se estableció las metodologías adecuadas (PCI, IFI, MANCHA DE ARENA, CBR y Viga Benkelman) y su procedimiento para la evaluación del estado funcional y estructural del pavimento flexible.
- Una vez realizado todos los ensayos en el tramo y analizando las principales características de cada uno de los métodos que existen para la evaluación superficial y estructural de pavimentos flexibles, el método más recomendable para su utilización es el método del PCI, ya que mediante este método se realizó el registro de las fallas que presenta el pavimento. Mientras que para la evaluación estructural se recomienda el método no destructivo de la viga Benkelman que nos brinda la capacidad de recuperación del pavimento.
- Los ensayos de Péndulo Británico y Círculo de Arena son muy importantes porque nos sirven de comprobación o verificación a la información recabada.
- La evaluación del estado superficial y estructural de un pavimento flexible depende mucho de la capacidad del evaluador ya que para realizar una evaluación efectiva se tiene que tener conocimiento acerca de los ensayos y métodos de evaluación.

- Los resultados obtenidos de todas las metodologías tanto para la evaluación del estado superficial como estructural del tramo en estudio nos hacen conocer que el tramo se encuentra en un estado de deterioro en torno a lo superficial, y en torno a lo estructural se pudo verificar que el pavimento aún tiene recuperación y se encuentra en buen estado.
- Se concluye que por la condición en que se encuentra el pavimento necesita un recapamiento, para poder ampliar el periodo de vida útil del pavimento para esto se debe realizar un recapado sobre la carpeta asfáltica.
- Para realizar el recapado se realizó los ensayos correspondientes de los agregados y del asfalto para saber si cumplen las condiciones adecuadas para el diseño de la carpeta delgada.
- Se observó que las obras de arte como ser cunetas a lo largo del tramo se encuentran con tierra y material que cae de los taludes por lo que es importante realizar la limpieza y retiro del material de estas obras de drenaje.
- Durante el proceso de cualquier producción, se tiene por principio básico el obtener resultados altamente eficaces al menor costo posible, y es con esta finalidad que realizamos el estudio económico de la capa de rodadura para el Tramo Vial Asfaltado Cruce Alto Senac-San Andrés, por lo que se concluye el estudio con resultados satisfactorios que son valorados solamente para el tramo vial mencionado.
- En lo que se refiere a la elección de la alternativa técnica y económicamente de la capa de rodadura, que será empleada como sugerencia para el Tramo Vial Asfaltado Cruce Alto Senac-San Andrés, se determinó que la alternativa que cumple con estos dos parámetros en todo sentido ya sea en forma técnica y económica es la carpetas asfálticas de bajo espesor o carpeta delgada $E = 4 \text{ Cm}$, la cual resulta ser la alternativa más económica, sin embargo en otros tramos viales puede que esta no sea la alternativa más adecuada, por lo que simplemente se hace referencia de que este estudio es netamente para este tramo vial en forma particular, haciendo un análisis desde el punto de vista técnico y económico, considerando las condiciones actuales

de los materiales existentes en la zona y del equipo necesario existente en nuestro medio.

- En el caso del tramo en estudio, se hace referencia de que se encuentra ubicado a una distancia considerable del lugar de producción de los materiales, por esa razón es que se tienen presupuestos elevados al momento de construir los pavimentos y tal es el caso particular si tomamos en cuenta que la ejecución del mismo se lo realizara por administración directa mediante la entidad dependiente de la Gobernación de Departamento de Tarija- “D.A.V.” (Dirección de Administración Vial).
- Las carpetas asfálticas de bajo espesor o carpetas asfálticas delgadas al igual que cualquier otra carpeta normal, deben ser lo suficientemente estables con el fin de que no se vuelvan rugosas o presenten ondulaciones por la acción del tránsito o los efectos del frenado del mismo. La estabilidad de la carpeta asfáltica se debe a la combinación de dos cualidades que en cierto modo se encuentran presentes en todas las mezclas asfálticas: La fricción y la cohesión. Sin embargo, se encuentran más relacionadas a la fricción que a la cohesión, aunque esta última juega un papel importante en ciertos casos. Cierta cantidad de cohesión es necesaria a fin de que el pavimento trabaje satisfactoriamente. Es bien conocido que toda carpeta asfáltica necesita cierta cantidad de tránsito o acción de amasado para que impida que el C.A. se muera y por lo tanto prolongar la duración de la carpeta. La acción continua de amasado causado por el tránsito tiende a remezclar los materiales y a conservarlos en su estado original. La cantidad óptima de C.A. debe ser determinada en un laboratorio por personas capacitadas, y, ante todo, es obligación de primordial importancia establecer y mantener uniformidad en las operaciones de construcción de la carpeta asfáltica, ya que todas las técnicas de proyecto serán inútiles a menos que las operaciones de construcción serán cuidadosamente controladas. Uno de los factores más importantes que se deben tener en cuenta en el proyecto de las carpetas asfálticas, el recomendar el cemento asfáltico adecuado según el clima de la región y materiales a emplear. El grado de penetración del cemento asfáltico juega un importante papel en el proyecto del mismo.
- La carpeta delgada de $E = 4$ Cm., son económicas, fáciles de construir y de larga duración pueden efectuarse sobre pavimentos asfálticos existentes o sobre una base

granular estabilizada en caso de pavimentos nuevos. El agregado pétreo para cada aplicación debe ser granulométricamente lo más uniforme posible y el tamaño máximo de cada aplicación sucesiva debe estar en proporción 2:1 respectivamente.

- Las carpetas asfálticas delgadas $E = 4$ Cm., son apropiadas ampliamente tanto en carreteras rurales como en las calles citadinas que están sometidas a grandes volúmenes de tránsito.
- Todas las mezclas bituminosas de alta calidad llamadas “mezclas en caliente” que están preparadas en plantas dosificadoras, centrales y mezcladoras, pueden variar sus espesores desde $E = 4$ Cm o más, dependiendo del tipo de carpeta y de su propósito, las mismas que se distinguen por el uso de agregados seleccionados y graduados con sumo cuidado junto con elementos de origen bituminoso y de naturaleza semisólida. La preparación, colocación y acabado de la mezcla se efectúa bajo especificaciones y controles más rígidos que los tratamientos superficiales, enfatizando en general en la garantía de mezclas estables de compactación muy densa y de mayor vida útil.
- El agregado grueso para las carpetas asfálticas delgadas, (agregados de material mineral que queda retenido en el tamiz N° 8 (2.36mm)), en muchas partes se están empleando los tamaños Standard de los agregados gruesos conocidos corrientemente como gradaciones de práctica simplificada, de acuerdo a la nomenclatura de AASHTO como M-43; este tipo de agregados a utilizarse para el diseño de la carpeta delgada, fue extraído de la comunidad de San Mateo “Chancadora Garzón”. Estos materiales tienen muy buenos resultados en laboratorio y cumplen con los requisitos especificados para la Mezcla asfáltica que será empleada para la ejecución de la Carpeta delga de $E = 4$ Cm.
- Referente al agregado fino (material mineral que pasa el tamiz N° 8 (2.36 mm)), que será empleado en la carpeta asfáltica delgada $E = 4$ Cm., este agregado es extraído también de la comunidad de San Mateo “Chancadora Garzón”, los mismos que serán empleados para la fabricación de la mezcla asfáltica y colocada en el tramo vial en estudio de acuerdo a la dosificación realizada en el diseño, de lo cual se tienen resultados satisfactorios.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un mejoramiento del tramo Cruce Alto Senac – San Andrés utilizando un recapado en todo su trayecto, ya que el proceso de reconstrucción no es necesario dado el estudio realizado de la estructura del pavimento, sin embargo, cabe resaltar que se debe realizar esta rehabilitación lo más pronto posible, ya que de no ser podría llegar a tomar la opción de reconstrucción del pavimento flexible en esta vía.
- Así mismo, antes de proceder a la colocación del recapado, deberán repararse todos los desperfectos graves, tales como hundimientos, las depresiones, los huecos, las grietas de borde, grietas longitudinales y transversales.
- Se recomienda realizar la limpieza de cunetas y alcantarillas para evacuar aguas superficiales en temporada de lluvia.
- La evaluación de un pavimento mediante los métodos aplicados debe ser realizado por personal competente y responsable, que sea capaz de identificar las fallas que se encuentren en el pavimento asfáltico, teniendo en cuenta las consideraciones ya descritas.
- Cuando se realice la inspección de campo de las unidades de muestra, las personas encargadas deberán contar con el equipo necesario para su desplazamiento, así como de los elementos necesarios para su seguridad, previniendo a los conductores y peatones con el fin de evitar accidentes.
- Tomando en cuenta el diseño de la carpeta delgada, se puede mencionar algunas sugerencias que se deben tomar en cuenta para obtener mejores resultados y por ende obtener mejores carpetas.
- El agregado fino para las carpetas asfálticas delgadas, debe ser en lo preferente de forma angulosa y textura superficial rugosa que permitan mejores condiciones de afinidad.
- Se recomienda que los agregados estén completamente limpios en lo posible para todo tipo de carpeta o tratamiento superficial.
- Se recomienda total cuidado en la ejecución de los ensayos de caracterización de manera de obtener mejores resultados.

- Se recomienda el uso de asfaltos con aquellos agregados que presenten las mismas características de los agregados estudiados.
- Se recomienda aplicar a la mezcla asfáltica un cemento asfáltico homogéneo en su calidad y además de cumplir con los ensayos previstos por las especificaciones correspondientes.
- En los agregados deben tomarse precauciones técnicas con respecto al cumplimiento de la granulometría establecida según especificaciones técnicas pertinentes.
- Se debe tener en cuenta en la mezcla asfáltica las cantidades de asfalto, temperatura de calentamiento de agregados y asfaltos, y temperatura de mezcla y compactación en situ.
- Se recomienda tomar en cuenta el estudio realizado para el Tramo Vial Asfaltado Cruce Alto Senac-San Andrés como una alternativa de capa de rodadura que puede ser construida con mayores probabilidades de durabilidad que los tratamientos superficiales triples, considerando que las carpetas delgadas son más fáciles de construir y tienen un control tecnológico en el momento del diseño en laboratorio y durante el mezclado en planta estacionaria que fortalece y garantiza una mezcla homogénea y de mayor durabilidad.