

CAPÍTULO I
GENERALIDADES

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Introducción

Los ensayos acelerados al pavimentos brindaran mucha información acerca del comportamiento real de estructuras de pavimentos sujetas a sollicitaciones mecánicas específicas que permite simular el desempeño en campo de una estructura de pavimento en un periodo reducido de tiempo, y cuya finalidad de estos es caracterizar y mejorar los materiales de uso, optimizar el diseño de pavimentos con el fin de prevenir subdiseños o sobredimensionamiento, generar o mejorar las especificaciones existentes entre otros.

Remontándonos a los antecedentes, se sabe que en los países que han generado mayor cantidad de avances en el área de pavimentos, ensayos en tiempo real se han realizado con mayor frecuencia puesto que no requieren de grandes equipos especializados para la realización de los ensayos. No obstante, el tiempo necesario está asociado con una gran cantidad de complicaciones ya que muchos de los tramos experimentales están ubicados sobre carreteras en operación. Sin embargo, existe la gran necesidad de poder caracterizar el desempeño a largo plazo de las estructuras de pavimentos como método único de poder desarrollar metodologías de diseño.

En cuanto a la deflexión se refiere, que es el parámetro de análisis estructural que mide la respuesta del pavimento ante las cargas de tráfico que se soportan a lo largo del tiempo, es decir, nos ofrece el valor del agotamiento estructural del pavimento. Para su medición, tradicionalmente se han utilizado tres métodos: método viga Benkelman, método del curviámetro y método del deflectómetro de impacto.

Para el análisis al pavimento generalmente se recurre a la perforación de calicatas y a tomar muestras para su posterior ensayo de laboratorio, este procedimiento es caro, lento y es “destrutivo”. El análisis estructural de los pavimentos flexibles por medio de la viga Benkelman, es un ensayo “no destructivo”, no altera la integridad del sistema y básicamente consiste en tomar deflexiones a nivel de superficie del pavimento; esto se fundamenta en que las curvas de deflexiones encierran cuantiosa información de las características del pavimento.

Por ello, el presente proyecto se enfoca en un análisis estructural de pavimentos, cuyo origen está basado en la aplicación de los resultados que nos brinda los ensayos acelerados y también la deflexión, que permitirán identificar los principales componentes afectados directa e indirectamente, estableciendo nuevas especificaciones de materiales que se basen en el desempeño real y aporte estructural de los materiales en campo. Respondiendo a la necesidad de profundizar en el estudio del comportamiento, desempeño y análisis de estructuras de pavimento para brindar mejores propiedades de servicio y durabilidad.

1.2 Justificación del proyecto de aplicación

El presente trabajo se basa en la aplicación de ensayos acelerados y la deflexión en pavimentos, con el fin de optimizar nuevas estructuras de pavimento en uso en el país, basándose en las condiciones climáticas, estructurales, de materiales y en especial el tráfico de la zona específica donde está construida o se planea construir la estructura para corroborar el correcto desempeño o identificar posibles deficiencias en la misma que nos lleve a la aceptación del pavimento.

Todo esto es debido a como se está haciendo actualmente la aplicación de ensayos convencionales de campo que nos amplía el alcance de la información disponible en cuanto a la condición estructural y funcional de los pavimentos. Estos ensayos de campo reflejan la condición al momento en que se realiza la medición, razón por la cual es particularmente importante dar seguimiento en el tiempo a la forma en que cambia la condición de la estructura con el paso de los vehículos y el transcurso del tiempo destinado a su vida útil. Adicionalmente, es de vital importancia contar con la información de demanda a que ha estado sujeto el pavimento, información que no se tiene disponible en la actualidad.

Además, es importante entender las limitaciones que tienen este análisis en campo a nivel de red para el estudio de las estructuras de pavimentos, pues para generar la información se requiere una gran cantidad de tiempo para profundizar en el estudio de su comportamiento. También existen limitaciones en cuanto al conocimiento de las cargas aplicadas a la estructura, por lo que no se puede analizar el desempeño real de la estructura ante la aplicación repetida de cargas en tanto no se conozca su cantidad y magnitud, en sí, se busca conocer claramente el comportamiento y variabilidad de la estructura en estudio.

Una limitación más para determinar el desempeño de un pavimento es que, por tratarse de estructuras en servicio, son muy limitados los casos donde se puede documentar las condiciones constructivas y obtener muestras del material utilizado para la construcción para realizar estudios comparativos.

1.3 Planteamiento del problema

1.3.1 Situación problemática

Los pavimentos son la superestructura de una vía, sea de carácter flexible o rígido está compuesto por un conjunto de capas cuya función principal es soportar las cargas rodantes y transmitir los esfuerzos al terreno, distribuyéndolos en tal forma que no se produzca deformaciones perjudiciales ante la presencia de dichas cargas, así como proveer una superficie lisa y resistente para los efectos del tránsito actual y futuro. Cuando llegan a actuar estos efectos sobre el pavimento se generan respuestas inmediatas que obedecen leyes casi identificadas como estados de esfuerzos, deformaciones unitarias y notorias deflexiones. Por lo tanto, las cargas actuantes en el pavimento es uno de los principales factores que influyen en el desempeño estructural de un pavimento sin dejar de lado las condiciones climáticas, suelo de fundación, materiales que lo constituyen, etc.

En los últimos años en Bolivia se ha reportado un incremento de las solicitudes del tráfico por el aumento de vehículos de transporte pesado que es debido principalmente a la expansión de las importaciones y exportaciones, esta mayor dinámica comercial da un crecimiento del transporte carretero que nos refleja como resultado mayores cantidades de carga a ser desplazadas, creciendo significativamente las dimensiones de estos vehículos, incrementándose también el valor promedio de la carga transmitida por eje, lo cual aumenta el nivel de deterioro de las capas que conforman el pavimento, grietas longitudinales, ahuellamiento, fisuras, deformaciones superficiales en sí, se presenta un daño prematuro al pavimento antes de haber cumplido con su periodo de vida útil al que fue proyectado.

Es aquí donde nace la necesidad de estudiar en qué casos serán aplicados estos ensayos acelerados para aceptar un pavimento para las debidas condiciones de carga que va a tener en su vida útil, que nos permite determinar la evolución en el desempeño superficial y la capacidad estructural del pavimento de manera continua durante su aplicación.

Por lo tanto, va surgiendo la continua obligación de construir redes viales cada vez más exigentes, capaces de soportar el tránsito creciente tanto en volumen como en cargas, cuyos resultados de ensayos hechos al pavimento presenten un alto grado de confiabilidad, que nos permita realizar el análisis estructural de manera rápida y puntual, optimizando el

diseño futuro de pavimentos con el afán de prevenir sub diseños o sobredimensionamientos.

1.3.2 Problema

Realizando ensayos al pavimento basándonos en ensayos acelerados y midiendo la deflexión ¿podríamos realizar el análisis estructural del pavimento para las condiciones de carga estándar de diseño que tiene en la actualidad?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar el análisis estructural al pavimento debido a la presencia de cargas estándar que presenta el pavimento en el periodo de vida útil al que fue proyectado mediante la aplicación de resultados de los ensayos acelerados y midiendo la deflexión que se presenta al aplicar dichas cargas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar las características generales de los pavimentos y de cómo se lleva a cabo su respectivo análisis estructural para la aplicación de ensayos acelerados y medición de la deflexión.
- Procesar un registro de datos, parámetros, gráficos y resultados de las mediciones hechas mediante el empleo de ensayos acelerados a pavimentos para extrapolar estos resultados a las condiciones del proyecto de aplicación.
- Medir la deformación en briquetas que presenten las características estructurales del tramo elegido.
- Medir las deflexiones máximas e intermedias en ambos carriles del tramo en estudio aplicando la viga Benkelman.
- Establecer los resultados del ensayo de deflexión para determinar la respuesta estructural, deflexión característica y radios de curvatura.
- Determinar la deflexión característica a partir de los resultados del ensayo de deflexión en el tramo seleccionado y compararlo con la deflexión admisible de diseño.

- Realizar el ensayo de CBR in situ para validar los resultados de deflexiones y hacer las respectivas comparaciones.
- Establecer conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos del análisis estructural y deformaciones.

1.5 Hipótesis

Si aplico a un pavimento ensayos acelerados, estos nos dejarán conocer el comportamiento interno de la estructura, que nos dará como resultados múltiples valores donde se podrá extrapolar estos resultados de manera que la información sea aplicable a las condiciones de la zona de estudio establecida que va a servir para hacer un análisis estructural del pavimento mediante la aplicación de estos resultados y también midiendo la deflexión.

1.5.1 Definición de variables independientes y dependientes

1.5.1.1 Variables independientes

Análisis estructural del pavimento

1.5.1.2 Variables dependientes

Análisis de los ensayos acelerados y deflexión en pavimentos

Tabla 1. Definición de variables independientes y dependientes

Variable	Concepto	Medición	Unidad
Dependientes Resultado del análisis de los ensayos acelerados del pavimento y deflexión	Cuando se aplica una carga en la superficie de un pavimento, el mismo se deforma conformando lo que se denomina curva o cuenco de deflexión.	Deflexión	mm
	Los ensayos acelerados son la aplicación de cargas de manera controlada sobre el pavimento de manera acelerada para determinar la capacidad estructural.	Deformación	mm
		Conjunto de mediciones dentro de los ensayos acelerados.	Global

Variable	Concepto	Medición	Unidad
Independiente Análisis estructural del pavimento	Los pavimentos están compuestos por un conjunto de capas destinados a resistir cargas del tránsito.	Pavimento	cm

Fuente: Elaboración propia

1.6 Alcance de estudio de aplicación

El proyecto de análisis estructural de pavimentos por medio de ensayos acelerados y deflexión está proyectado en dos etapas principales, esta primera es la preparación previa a la parte práctica que será la recolección de todos los antecedentes que nos llevan a esta aplicación, identificado cual es el problema principal y ante este justificar por qué es necesario realizar un análisis estructural al pavimento en un tramo de la red departamental de la ciudad de Tarija. Para poder encarar el proyecto se necesita conocer una justificación teórica de lo todo lo relacionado al análisis estructural, prácticas de laboratorio y medición de deflexión, porque con estos conceptos se puede establecer relaciones y conclusiones del tramo en específico.

La segunda etapa nos llevará a la aplicación de los resultados de estos ensayos acelerados y medición de las deflexiones en plataforma. Donde estas se desarrollarán aplicando técnicas experimentales y técnicas de diagnóstico para realizar los cálculos respectivos y hacer una interpretación a estos resultados. Con esos finalmente llegar a la conclusión si nuestros objetivos fueron cumplidos.

En el primer capítulo se realiza la exposición teórica del por qué se quiere realizar esta aplicación de ensayos acelerados y medir la deflexión. Empezando con características generales que enfoquen de manera global todo el trabajo, teniendo ya esto definido ir desglosando puntualmente que justificación se asume ante el proyecto identificando y el problema principal que nos lleva a considerar esta aplicación como importante para el estudio del pavimento perteneciente a una de las zonas elegidas en la ciudad de Tarija llegando a exponer los objetivos de interés.

En el segundo capítulo estará proyectada en miras de lo que será el desarrollo del presente proyecto, donde cada uno de estos puntos del capítulo arma esquemáticamente cuales son los factores influyentes, dependientes e independientes. Para poder realizar el proyecto de aplicación es de mucha necesidad conocer de manera teórica cual es el comportamiento estructural de los pavimentos, definiciones y características generales que ayuden a encarar la parte práctica.

Todo esto se llevará a cabo definiendo primeramente qué es un pavimento, cuántos tipos existen, sus funciones estructurales en conjunto y por cada capa. Luego establecer cómo es que son los ensayos acelerados y como se los realiza, los mismo para la deflexión que esta abarca materiales y técnicas de campo. Y finalmente definir de manera amplia los que es el análisis estructural en pavimentos ya que estos conceptos influirán en cómo realizar la interpretación de resultados.

El capítulo tercero es considerado uno de los más importante de todo el proyecto de aplicación, es aquí donde se desglosa de manera práctica todas las técnicas establecidas. Empieza en la elección del tramo, características generales de la zona, definiendo las secciones que se consideran representativas, las progresivas iniciales, intermedias y finales, midiendo la deflexión máxima en plataforma utilizando la viga Benkelman y realizamos un procedimiento secuencial de cálculos en base a los resultados de laboratorio y valores de deflexiones máximas para concluir con un análisis de resultados. A objeto de validar los resultados de deflexiones obtenidos en campo se hace una comparación con el ensayo llamado CBR In situ para determinar la exactitud de estos resultados.

Y de manera concluyente en el capítulo final se efectuará el análisis de resultados, donde se debe realizar las debidas conclusiones respecto a la aplicación de estos ensayos acelerados y la medición de las deflexiones máximas del tramo en estudio, donde se dirá expresamente si el objetivo principal y los específicos fueron llevados a cabo y si la hipótesis planteada resulto verdadera o falsa. Y finalmente establecer recomendaciones a futuro sobre las prácticas en campo y toma de muestras para realizar en laboratorio.

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS Y SU ANÁLISIS ESTRUCTURAL

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS Y SU ANÁLISIS ESTRUCTURAL

2.1 Pavimentos

Un pavimento puede definirse como la capa o conjunto de capas de materiales apropiados, comprendidos entre el nivel superior de las terracerías y la superficie de rodamiento, cuyas principales funciones son la de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiada resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales.

En otras palabras, el pavimento es la superestructura de la obra vial, que hace posible el tránsito expedito de los vehículos como la comodidad, seguridad y economía previstos por el proyecto. La estructura o disposición de los elementos que lo constituyen, así como las características de los materiales empleados en su construcción, ofrece una gran variedad de posibilidades, de tal suerte que pueda estar formado por una sola capa o, más comúnmente, por varias y, a su vez, dichas capas pueden ser de materiales naturales seleccionados sometidos a muy diversos tratamientos; su superficie de rodamiento propiamente dicha puede ser una carpeta asfáltica, una losa de concreto hidráulico o estar formada por acumulaciones de materiales pétreos compactados.

De modo bastante arbitrario y con fines fundamentales prácticos, los pavimentos se dividen en flexibles y rígidos. Sin embargo, la rigidez o flexibilidad de un pavimento exhibe no es fácil de definir tan adecuadamente como para permitir una diferenciación precisa que tan rígido puede ser un pavimento flexible o que tan flexible puede llegar a ser un pavimento rígido.

Pero para fines prácticos se considera pavimento rígido aquel cuyo elemento fundamental resistente sea una losa de concreto hidráulico; en cualquier otro caso, el pavimento se considerará flexible. Tan arbitraria clasificación concuerda bastante con la generalmente aceptada.

2.2 Tipos de pavimentos

2.2.1 Pavimento flexible

Caracterizado por tener en la parte superior, una capa bituminosa, apoyada sobre una o varias capas de gran flexibilidad (base granular y sub-base granular), las cuales transmiten los esfuerzos al terreno de soporte, mediante un mecanismo de disipación de tensiones, presiones que van disminuyendo en su magnitud, con la profundidad. Este tipo de pavimento, presenta las siguientes particularidades:

- Las capas granulares, se colocan para disminuir el espesor de la carpeta asfáltica.
- Se considera que los esfuerzos se han disipado, cuando el esfuerzo en un punto cualquiera, es menor que el 10% de la presión de contacto.
- Las magnitudes normales de los módulos de las capas de esta clase de estructuras, están alrededor de:

- Carpeta asfáltica	25000 Kg/cm ²
- Base granular	2000 Kg/cm ² a 5000 Kg/cm ²
- Sub base granular	1000 Kg/cm ² a 3000 Kg/cm ²

En pavimentos flexibles, apoyados sobre sub-rasante fina, por ningún motivo, se debe omitir la sub base granular.

2.2.2 Pavimento rígido

Constituido por una losa de concreto hidráulico de gran rigidez, la cual está apoyada sobre una capa de material seleccionado (sub base granular) o sobre la sub rasante, en el caso de que sea granular; la transmisión de esfuerzos al terreno de soporte, se produce mediante un mecanismo de distribución de tensiones.

- La losa, es el elemento encargado de dar el aporte estructural del pavimento.
- La sub-base granular, debe dar a la losa un apoyo óptimo a lo largo del tiempo de servicio de la estructura, controlando su deformabilidad.
- La deformación de la sub-base granular de apoyo, produce salida de agua y de su material fino, produciendo la descompactación del apoyo y su erosión.

- Una forma de disminuir considerablemente el efecto erosivo producido por el tránsito en el apoyo, es utilizar una base asfáltica para esta función.

2.3 Diferencia entre pavimento flexible y pavimento rígido

Tabla 2. Diferencia entre pavimento flexible y pavimento rígido

Pavimento flexible	Pavimento rígido
Grandes tensiones	Pequeñas tensiones
Grandes deformaciones	Pequeñas deformaciones
Deflexiones admisibles < 0.5 mm	Erosión en la sub base
$\epsilon_{\text{carpeta}} 10^{-4}$, $\epsilon_{\text{sub-rasante}} 10^{-4}$	$M_r \text{ concreto} = 40 \text{ a } 45 \text{ kg/cm}^2$
$\sigma_{\text{sub-rasante}} = 0.1 Q_{\text{contacto}}$	Si $\sigma_{\text{losa}} > 0.45 M_r = \text{fatiga}$
Menor durabilidad	Mayor durabilidad

Fuente: Elaboración propia

2.4 Funciones de las capas de los pavimentos

2.4.1 Funciones de las capas de los pavimentos flexibles

2.4.1.1 Sub-base granular

- Economía con respecto a la base y al concreto asfáltico.
- Transición entre materiales de distinta calidad.
- Control de deformaciones, absorbiendo los cambios volumétricos de la sub-rasante.
- Debido a su distribución granulométrica, sirve para romper la capilaridad ayudando a mantener un buen drenaje en la estructura.
- Presenta muy poco aporte estructural, debido a las características de forma, textura y gradación de sus partículas.

2.4.1.2 Base granular

- Es de gran aporte estructural, debido a las características de gradación y trituración de sus partículas (finos no plásticos).

- Economía con respecto a la carpeta asfáltica.
- Buen drenaje, debido a que presenta pocos finos.
- Sirve como rodadura provisional.

2.4.1.3 Riego de imprimación

- Adherir la base granular a la carpeta asfáltica.
- Impermeabilizar la interfase entre la carpeta asfáltica y la base granular.

2.4.1.4 Carpeta asfáltica

- Da la resistencia a la tracción en la estructura.
- Al ser “impermeable”, evita que el agua ingrese a la estructura del pavimento, junto con el bombeo y el peralte de la calzada.
- Proporciona una superficie uniforme, estable y segura al tránsito.

2.4.2 Funciones de las capas de los pavimentos rígidos

2.4.2.1 Sub-base granular

- Controlar el fenómeno del bombeo.
- Servir como transición.
- Proporcionar apoyo uniforme y estable en el tiempo a la losa de concreto; se controla mediante el análisis de erosión, durante el diseño de la estructura.

2.4.2.2 Losa de concreto hidráulico

- Su principal función es el aporte estructural, ya que, del paquete de la estructura, es el único elemento que da resistencia. El parámetro de diseño, es el módulo de rotura.
- Proporciona una superficie uniforme, estable y segura al tránsito.
- Impermeabiliza la estructura del pavimento.

2.4.2.3 Juntas

- Controlar el agrietamiento del concreto simple, por efectos de retracción, expansión y alabeo.
- Facilitar la construcción de la estructura de la vía.

2.5 Variables que participan en el diseño y comportamiento de los pavimentos

Variables estructurales, tránsito, clima y condiciones regionales, costos de construcción y costos de mantenimiento.

2.5.1 Variables estructurales

- Terreno de fundación o sub rasante
- Paquete estructural del pavimento

Para el diseño y la modelación del comportamiento de una estructura de pavimento, se requieren los espesores de las capas, y las características mecánicas de los materiales (E , μ). A menor calidad de un material, se requiere mayor espesor de la capa que compone.

Suelos finos y suelos gruesos - módulos resilientes

Materiales ligados - módulos dinámicos

2.6 La resistencia estructural

La primera condición que debe cumplir el pavimento es soportar las cargas impuestas por el tránsito dentro del nivel de deterioro y paulatina destrucción previstos por el proyecto. Las cargas del tránsito producen esfuerzos normales y cortantes en todo punto de la estructura. La metodología teórica para el análisis de resistencia de los pavimentos es proporcionada por la mecánica de suelos y es sabido que en ese campo las teorías de falla de mayor aceptación son las de esfuerzo cortante; como consecuencia, en el estudio de los pavimentos flexibles suele considerarse a los esfuerzos cortantes como la principal causa de falla desde el punto de vista estructural; correspondientemente, la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos resulta ser la propiedad fundamental.

Además de los esfuerzos cortantes actúan en los pavimentos esfuerzos adicionales producidos por la aceleración y frenaje de los vehículos y esfuerzos de tensión que se desarrolla en los niveles superiores de la estructura, a cierta distancia del área cargada, cuando esta se deforma verticalmente hacia abajo. De hecho, el problema de la resistencia se plantea en general en relación con la estructura de los materiales del pavimento, pues, aunque los materiales de la terracería sean de peor calidad, el espesor protector que el propio pavimento representa, hace que los esfuerzos que llegan a aquellos niveles

alcancen valores inferiores a la capacidad de carga a la falla de los suelos, siendo este, un panorama general.

La determinación de la resistencia de los materiales que constituyen un pavimento es un problema difícil y no resuelto satisfactoriamente; influye en el no solo el tipo de suelo y su tratamiento, sino también su interacción con los efectos de la intemperie, de los que la variación del contenido de agua es seguramente el más importante. El ingeniero no está casi nunca para predecir cuál será el contenido de agua más desfavorable que llegará a tener los materiales que maneja; sin embargo, este dato es necesario para el proyecto, que suele tender a definir la resistencia en esa condición crítica. Esta es otra de las incertidumbres básicas de diseño, que se ha resuelto a base de hipótesis más o menos justificadas por la experiencia, tales como considerar que el suelo llegará a saturarse, adquirirá una humedad de equilibrio, mantendrá la humedad óptima de compactación u otra próxima a ella, etc.

Otro factor que influye sustancialmente en la resistencia de los materiales es el tipo de carga que se le aplica y la velocidad con que ello se hace. Los pavimentos están sujetos a cargas móviles y los efectos de estas son menos conocidos y diferentes que los de las cargas estáticas; esta es otra fuente de incertidumbre que se ha tratado de resolver en los análisis teóricos, admitiendo que las cargas actuales son de tipo estático en las pruebas de laboratorio y en los métodos de diseño en ellas fundado, la situación es un poco más realista, pues si bien las pruebas se realizan con cargas estáticas o con velocidades de aplicación muy lenta, su correlación para la obtención de normas de criterio se hace con el comportamiento real de los pavimentos bajo cargas móviles.

2.7 La deformabilidad

En los pavimentos las deformaciones interesan, como es usual en la ingeniería, desde dos puntos de vista, por un lado, porque las deformaciones excesivas están asociadas a estados de falla y, por otro, porque es sabido que un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente de las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho.

Las cargas del tránsito producen en el pavimento deformaciones de varias clases. Las elásticas son de recuperación instantánea y suelen denominarse plásticas dentro de la

tecnología, a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora. Bajo carga móvil y repetida, la deformación plástica tiende a hacerse acumulativa y puede llegar a alcanzar valores inadmisibles. La deformación elástica repetida preocupa sobre todo en los materiales como resistencia a la tensión, colocados en la parte superior de la estructura, en los que puede llegar a generar falla por fatiga si el momento de la deformación es importante y los materiales son susceptibles. Los materiales que acusan fuertes deformaciones elásticas bajo carga, los más peligrosos a este respecto, son muchas veces de origen volcánico.

Existe una fuerte corriente de opinión en el sentido de que la deformabilidad de los pavimentos flexibles es el punto básico a considerar y, de hecho, un buen número de métodos de diseño se centran en mantenerla en límites tolerables. El señalar estos límites es tarea bastante compleja de lo que en principio pudiera pensarse y la solución suele intentarse con base en normas de experiencia. Otro problema importante radica en medir la deformación que el pavimento va a sufrir realmente bajo la carga. Este problema debe considerarse en dos fases. Primero, la estimación de las deformaciones elásticas, que es posible hacer con razonable precisión una vez conocidos los materiales que constituirán el pavimento, obteniendo su módulo de deformación por medio de alguna de las diversas pruebas de campo que hoy existen y que pueden realizarse sobre terraplenes de prueba en las condiciones consideradas críticas; estas pruebas pueden ser de placa, con un deformómetro tipo Benkelman, con algún aparato dinámico, o con deformómetros sónicos, eléctricos, etc. Algunas instituciones realizan muchas de estas mediciones en pavimentos construidos, tratando de obtener correlación para proyecto entre las deformaciones elásticas y el clima, tránsito o la naturaleza de los materiales. Tampoco faltan intentos en medir el módulo de deformación en laboratorio (por ejemplo, prueba triaxial), tropezando con los inconvenientes de tener que realizar un experimento poco representativo, pues es difícil reproducir en laboratorio las condiciones críticas del campo y superar los problemas de escala. Conociendo el módulo de deformación de las diferentes capas, la deformación elástica puede calcularse con base en algunas de las teorías mencionadas.

La segunda base del problema de medición de deformaciones se refiere a las plásticas, efecto acumulativo de la carga repetida. Este aspecto se ha atacado con criterios puramente empíricos, cuyo aprovechamiento por los métodos de diseño requiere de extrapolaciones experimentales; por ejemplo, la diversidad de las cargas se refiere a una carga única, llamada estándar, resultado de estudios estadísticos en tramos experimentales o en carreteras, sometidos a la acción de tránsito real o clasificado. Se intenta que la carga estándar tome en cuenta el efecto de la repetición, pues al definirla se ha correlacionado su propio efecto destructivo con el que causaría las cargas reales con sus repeticiones respectivas. Una vez fijado en tránsito “de análisis” lo que suele hacerse actualmente en todos los métodos de diseño que toman en cuenta estas cuestiones es prefijar, con base experimental, una deformación permanente máxima y el pavimento se diseña de manera que ésta se presente únicamente al fin de la vida útil prevista.

Existen dos criterios para fijar la deformación máxima permisible; o bien se habla de la que produce la falla del camino, entendiendo por ésta la condición en la que el pavimento llega a perder las características de servicio para las que fue diseñado (criterio AASTHO o de índice de servicio) o bien se toma en cuenta la deformación que obligue a una reconstrucción de determinada importancia económica.

2.8 Análisis estructural de pavimentos

El análisis de las estructuras de pavimento se basa en la teoría de la elasticidad aplicada a materiales perfectamente elásticos, isotrópicos y homogéneos. Todos los materiales poseen propiedades de elasticidad, lo que en pocas palabras se puede definir como la capacidad que tiene un material de deformarse bajo el efecto de una carga externa y recuperar la forma inicial cuando la carga desaparece, el rango de cargas admisibles para lograr que el cuerpo se comporte dentro del límite elástico es variable de acuerdo al tipo de material. La estructura del pavimento debe garantizar que al material de soporte lleguen esfuerzos suficientemente bajos para lograr un comportamiento elástico en la masa de suelo. Si ocurre que la resistencia del suelo, en un punto dado, es menor que los esfuerzos inducidos se producirá la falla desde el punto de vista elástico. Ahora, si el elemento de suelo está confinado se genera una capacidad adicional que hace que no se produzca la

falla general, simplemente se presenta en ese sitio específico una plastificación del material, fluencia y transmisión de esfuerzos al material vecino.

Ya en este punto el comportamiento cambia y las consideraciones iniciales de elasticidad dejan de ser correctas. Si las cargas aumentan la zona plástica crece hasta llegar a la resistencia última del medio continuo. La estructura del pavimento rígido conformada principalmente por las losas de concreto debe garantizar la adecuada transferencia de esfuerzos al material de soporte (sub rasante natural o estabilizada, materiales granulares o estabilizados), para lo cual las losas de pavimento se diseñan bajo dos criterios:

2.8.1 Análisis de erosión

En el que se controlan las deformaciones máximas adoptando un modelo que mida el trabajo que realiza la esquina de la losa cuando es deformada por la acción de las cargas.

2.8.2 Análisis de fatiga

En el que se controlan los esfuerzos máximos a los que puede estar sometida cada losa, adoptando en el modelo un funcionamiento bajo el esquema de tensiones variables, es decir, aquel en la cual los esfuerzos varían en función del espesor del elemento (esfuerzo máximo de tensión en una cara y esfuerzo máximo de compresión en la cara opuesta). La falla a edad temprana en pavimentos rígidos está ligada a un gran número de variables que están implícitas en el diseño y que pueden subestimarse llegando a estructuras no adecuadas para soportar el tránsito durante el periodo de diseño de la estructura.

2.9 Deflexión en pavimento

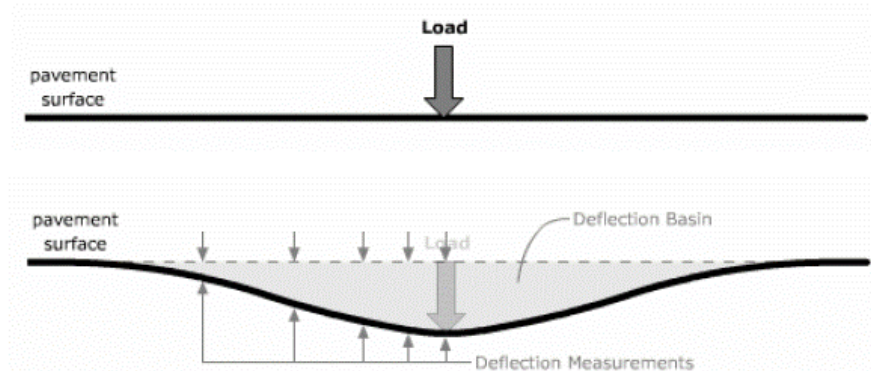
La medición de las deflexiones se utiliza ampliamente para conocer la capacidad estructural de los pavimentos en campo, y dentro de la tecnología de pavimentos, particularmente en la evaluación estructural de los mismos existen diversas metodologías y equipos para tales propósitos.

2.9.1 Forma de la deflexión

Cuando se aplica una carga en la superficie de un pavimento, el mismo se deforma conformando lo que se denomina curva o cuenco de deformación o deflexión. La forma, profundidad y tamaño de dicha curva depende de diferentes variables o parámetros (espesores, rigidez del pavimento y de la capa subyacente, magnitud de la carga, etc.). La

figura a continuación presenta una curva de deformación típica. Dicha carga aplicada es distribuida a lo largo del pavimento en las capas subyacentes. El cuenco producido por las cargas al paso de los vehículos viaja a lo largo de la estructura de pavimento bajo las llantas de los vehículos en movimiento.

Figura 1. Cuenco o línea de influencia producida por una carga



Fuente: Análisis elástico de la deflexión de equipos de medición dinámica FWD en la auscultación de pavimentos flexibles

Diferentes estudios han concluido que las deflexiones en los sensores más alejados en la zona de aplicación de la carga corresponden fundamentalmente a la respuesta de la sub rasante, mientras que las deflexiones en puntos cercanos a la carga se deben a las respuestas y características de las capas superiores del pavimento y a la sub rasante.

La deflectometría consiste en la aplicación de cargas en la superficie del pavimento, midiendo la respuesta estructural del mismo en términos de deflexiones verticales.

2.9.2 Medición de la deflexión

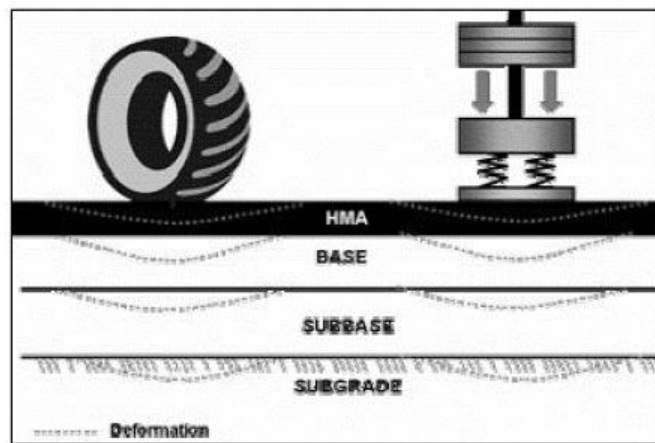
La deflexión de un pavimento es el desplazamiento vertical de la superficie del pavimento en respuesta a la aplicación de una carga externa y representa una respuesta total del sistema constituido por el pavimento y la explanada, ante la aplicación de dicha carga. Cuando ésta se aplica sobre la superficie, las capas se hunden, desarrollándose esfuerzos y deformaciones en cada capa, como de manera resumida.

Para la determinación de la capacidad estructural del pavimento se hace necesario conocer la forma como la estructura está respondiendo a las solicitudes de carga. Mediante

ensayos no destructivos, se estima la deflexión del pavimento o deformación vertical. Conforme avanza la tendencia hacia el análisis y diseños mecanicistas, basados en principios ingenieriles fundamentales, la utilización de dichos datos de deflexión se ha vuelto más sofisticada. El conocimiento de los módulos de las diferentes capas que conforman la estructura de un pavimento resulta entonces necesario para este tipo de procedimientos.

Los ensayos no destructivos de deflexiones proporcionan información que se utiliza para la evaluación estructural de los pavimentos. Además, los resultados de dichas deflexiones pueden emplearse a su vez en las siguientes características de los pavimentos.

Figura 2. Deformación del pavimento sujeto a una carga



Fuente: Análisis elástico de la deflexión de equipos de medición dinámica FWD en la auscultación de pavimentos flexibles

Las estructuras de pavimento con grandes espesores de mezcla asfáltica pueden presentar deflexiones reducidas a pesar de exhibir fallas estructurales por deformación permanente, tales como ahuellamientos, depresiones y ondulaciones. Si estos defectos no se deben al flujo o desplazamiento plástico de las capas asfálticas por una estabilidad baja, entonces están asociados al apoyo insuficiente ofrecido por las capas subyacentes.

2.10 El retrocálculo

Retrocálculo es la traducción local del término “backcalculation”, para el cual en otros países se utiliza la expresión “cálculo inverso” que quizás resulta más apropiada y descriptiva.

Las diferentes teorías estructurales permiten el cálculo de tensiones, deformaciones y deflexiones a partir de una estructura dada, si se conoce la carga aplicada, los espesores de las capas y sus parámetros estructurales (módulos, coeficientes de Poisson). Evidentemente, puede calcularse y obtenerse de esta manera la curva de deformación del pavimento, es decir, las deflexiones que se originan en la superficie del mismo a diferentes distancias de la carga.

El retrocálculo es precisamente el cálculo inverso. Conociendo la curva de deformación del pavimento (deflexiones medidas), la carga aplicada y los espesores que componen las diferentes capas de la estructura, se trata de determinar los parámetros estructurales (módulos) característicos del pavimento.

El retrocálculo involucra el cálculo de deflexiones teóricas debido a la aplicación de la carga, conocidos los espesores de la estructura en cuestión y asumiendo, en primera instancia, determinados valores para los módulos de cada una de las capas.

Estos valores teóricos de deflexiones se comparan con los valores medidos. Mediante un proceso interactivo se ajustan entonces los módulos asumidos inicialmente, hasta que las curvas de formación teórica (calculadas) y medidas ajusten razonablemente bien. Los módulos hallados de esta manera se consideran representativos de la respuesta del pavimento frente a la carga, y por lo tanto pueden ser utilizados luego para el cálculo y análisis de tensiones o deformaciones específicas en la estructura.

En casos particulares, ningunos de los programas basados en la teoría elástico multicapa podrían garantizar los resultados exactos para cada sección de la prueba. Distintas agencias viales que utilizaron el mismo software de retrocálculo para determinar los módulos para la misma sección del pavimento produjeron diversos resultados. Es decir, no tiene solución única. Por lo tanto, dirigir el juicio desempeña un papel importante en la evaluación de los resultados de la prueba.

La gran mayoría de los errores de retrocálculo ocurren durante la evaluación de la deflexión de la capa superficial. Una razón puede ser la diferencia entre los patrones de deformaciones dinámicas y estáticas de la capa superficial.

El cálculo directo de tensiones, deformaciones y desplazamientos (deflexiones) a través de la resolución de las ecuaciones diferenciales que determinan los estados de tensiones del pavimento, tiene como resultado una solución única. Sin embargo, y a diferencia del cálculo directo, uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en el proceso de retrocálculo (cálculo inverso), es la existencia de múltiples soluciones que satisfacen un mismo problema desde el punto de vista matemático.

Los primeros usos de los datos de deflexiones medidas en la superficie del pavimento consideraban en general relaciones empíricas entre la deflexión máxima directamente debajo de la carga aplicada y determinados factores. Usualmente se comparaban valores estadísticos de dicha medida de deflexión en una determinada sección, con niveles o deflexiones “tolerables” o “admisibles” para dicho pavimento bajo cierto tránsito esperado.

No es recomendable los análisis de retrocálculo de deflexión de secciones que tengan espesores de capa superficial menos de 10 cm. Esto es consistente con observaciones y recomendaciones encontradas en la literatura. Un acercamiento alternativo sería utilizar el módulo de la CA con datos de temperatura de secciones de espesores más gruesas con las características similares de la mezcla para fijar el módulo de capa delgada en un valor conocido.

2.11 Modelos matemáticos para pavimentos

2.11.1 Análisis elástico de capas

Los modelos matemáticos desde hace muchos años han sido grandes herramientas en la solución de problemas de ingeniería, los pavimentos flexibles no son ajenos a esto, motivo por el cual existen gran cantidad de modelos que son utilizados para representar la compleja realidad de los pavimentos, a fin de encontrar una solución adecuada a los problemas que presentan.

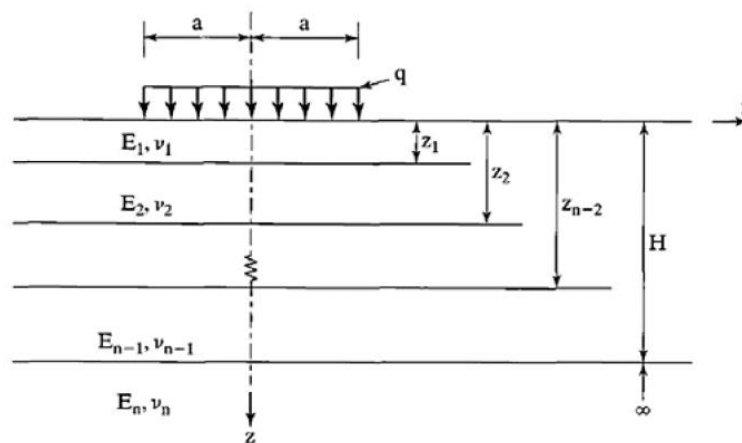
Se menciona que hasta la fecha se han desarrollado un sinnúmero de sistemas para la evaluación y estudio de pavimentos, entre los que para un análisis estructural de pavimentos flexibles se tienen sistemas de análisis con elementos finitos, elástico de capas, sin malla.

A modo de historia se dice que todo comenzó con Boussinesq, quien propuso en 1885 como primer análisis considerar al pavimento como “un semi espacio homogéneo, que tiene un área y una profundidad infinita con una carpeta delgada encima, donde son aplicadas las cargas”, a fin de tener una buena representación del pavimento bajo la acción de cargas.

Donald M. Burmister (1945) en 1943, basándose de los conceptos y el primer análisis propuesto por Boussinesq desarrolló y presentó en la Universidad de Columbia la teoría de capas elásticas. Esta teoría se podía aplicar a estructuras de pavimentos, teniendo en cuenta las propiedades de los materiales usados en cada estrato que conformaba el suelo con la finalidad de hallar los estados de esfuerzos a cualquier profundidad. El procedimiento de este modelo es complejo ya que su solución comprende transformadas de Fourier, de Hankel y series de Bessel.

Antes de dar a conocer los modelos desarrollados en el análisis elástico de capas (teoría de capas elásticas), se precisa lo expuesto por Flores y Legua; que el sistema (pavimento) en este análisis es dividido en un número arbitrario de capas, los espesores y propiedades de las capas varían gradualmente pero el módulo de elasticidad E y el módulo de Poisson ν se consideran constantes en cada capa. Así también se debe tener en cuenta las siguientes suposiciones.

Figura 3. Análisis de capas elásticas



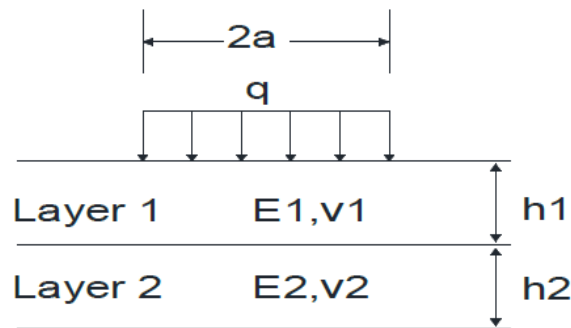
Fuente: Burmister 1945

- Cada capa es homogénea y elástica lineal con un espesor finito pequeño.
- No es considerado el peso propio.
- Una presión circular es aplicada en la superficie del pavimento.
- Existe compatibilidad de esfuerzos y deformaciones en dos capas adyacentes.

2.11.2 Modelo bicapa

En este modelo el sistema se divide en dos capas, se aplica una carga de presión uniforme “ q ” sobre un área circular de radio “ a ”, Burmister y Huang proponen ábacos para este modelo a partir del modelo multicapa, el comportamiento del suelo no es homogéneo, es necesario incluir una capa de transmisión ya que es difícil representar esta transmisión del pavimento a la sub rasante. Los ábacos propuestos ayudan a obtener las siguientes respuestas como análisis del pavimento flexible.

Figura 4. Modelo bicapa



Fuente: Huang, 1993

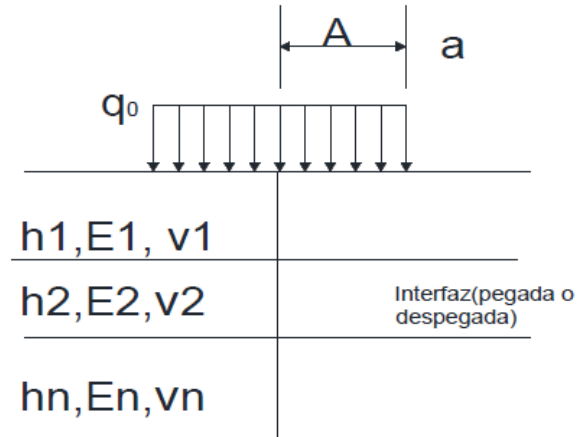
- Distribución del esfuerzo vertical (σ_z) para h_1/a .
- Esfuerzo vertical en la interface entre el pavimento y la sub rasante bajo el centro de la carga (σ_c).
- Desplazamiento de la superficie bajo el centro de la carga ($U_s = 0$).
- Deformación de tracción en el fondo de la capa 1 bajo el centro de carga (ϵ_{err}).

De lo anterior se puede decir que este modelo depende de la razón entre del espesor de la primera capa y el radio del área circular h_1/a , así también de los módulos de elasticidad de las capas E_1 y E_2 .

2.11.3 Modelo multicapa

El sistema está conformado por $n-1$ capas horizontales de espesor h_i , módulo de elasticidad E_i y módulo de Poisson ν_i y se aplica una carga de presión uniforme “ q ” sobre un área circular de radio “ a ”.

Figura 5. Modelo multicapa



Fuente: Reyes 1999

Para las variables anteriormente definidas, la deflexión en el centro de carga formulada por Palmer y Barber (Reyes, 2003), está dada por la siguiente expresión:

$$w_0 = \frac{2qa(1 - \nu^2)}{E_n} \left[\frac{1 - \frac{E_n}{\hat{E}}}{\left[1 + \left(\frac{h_1 + \dots + h_{n-1}}{h_{n-2}} \right)^2 \left(\frac{\hat{E}}{E_n} \right)^{\frac{2}{3}} \right]} + \frac{E_n}{\hat{E}} \right]$$

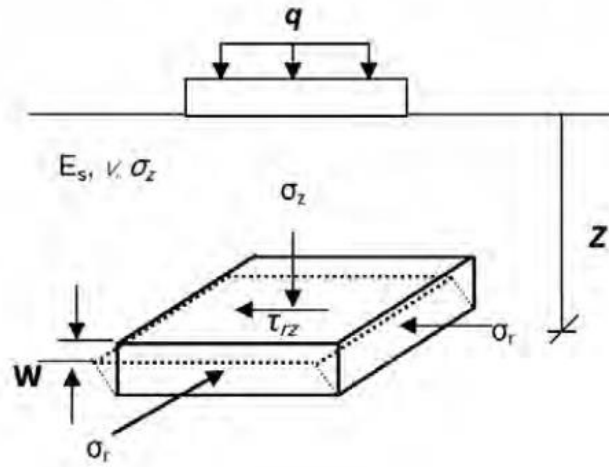
Donde:

$$\hat{E} = E_1 \left(\frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_1}} + \dots + h_{n-1} \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right)^3$$

2.11.4 Modelo de Boussinesq

Boussinesq se basó en la aplicación de una presión uniforme “q” sobre un área circular de radio “a”, suponiendo que el macizo es lineal, isotrópico y homogéneo con módulo de elasticidad E_s y módulo de Poisson ν . Con este modelo es posible determinar esfuerzos y deformaciones a una profundidad z .

Figura 6. Modelo de Boussinesq



Fuente: Burmister, 1945

Las deformaciones y esfuerzos en el eje de carga están dados por las siguientes ecuaciones:

$$w = \frac{q}{E_s} \left[2(1 - \nu^2)(a^2 - z^2)^{\frac{1}{2}} - \frac{(1 + \nu)z^2}{(a^2 - z^2)^{\frac{1}{2}}} + (\nu + 2\nu^2 - 1)z \right]$$

En la superficie del macizo ($z = 0$)

$$w_0 = 2 \frac{q}{E_s} a(1 - \nu^2)$$

Esfuerzo vertical y radial:

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left[(1 + 2\nu) - \frac{2(1 + \nu)z}{(a^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

Cizallamiento máximo:

$$t_{\max} = \frac{\sigma_z - \sigma_r}{2}$$

Este modelo también puede ser solucionado desarrollando la ecuación de la elíptica de Poisson de la elastostática para lo cual es necesario trabajar con formulaciones variacionales.

Módulo de elasticidad del pasivo semi infinito de Boussinesq:

$$E_S = \frac{q_0}{\pi D_R} (1 + \mu^2) \left\{ \int_{-A}^A \int_{-\sqrt{A^2 - x^2 - 3\frac{A}{2}}}^{\sqrt{A^2 - x^2 + 3\frac{A}{2}}} \left[\frac{1}{\sqrt{(x-R)^2 + y^2}} \right] dy dx + \int_{-A}^A \int_{-\sqrt{A^2 - x^2 - 3\frac{A}{2}}}^{\sqrt{A^2 - x^2 + 3\frac{A}{2}}} \left[\frac{1}{\sqrt{(x-R)^2 + y^2}} \right] dy dx \right\}$$

Donde:

D_R = Deflexión a una distancia R

E_S = Módulo de elasticidad del masivo semi infinito de Boussinesq

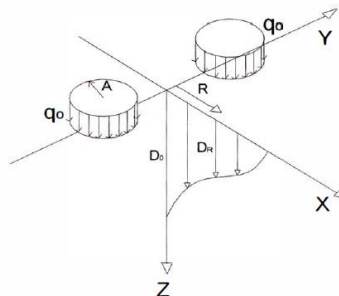
μ = Ratio de Poisson

A = Radio de la huella circular de contacto

q_0 = Presión de inflado

R = Distancia a la que se mide la deflexión D_R

Figura 7. Deflexión producida por dos llantas

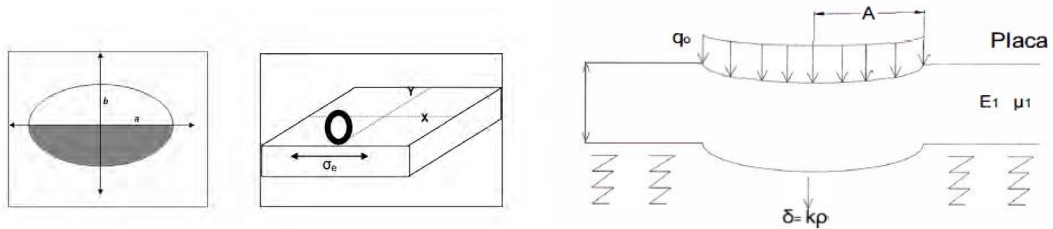


2.11.5 Modelo de Westergaard

Westergaard aporta que la carga P está aplicada sobre un área elíptica de semiejes a y b , donde a está siempre paralelo al lado de la placa si la cara es próxima a ella. Además, él supone que el pavimento es un medio homogéneo, isotrópico y elástico, de módulo de elasticidad E , coeficiente de Poisson ν y de espesor constante h , por último, caracteriza al suelo por una serie de resortes donde el desplazamiento vertical w es proporcional a la presión vertical en ese punto.

$$D_{rig} = \frac{E_1 h_1^3}{12(1 - \mu_1^2)}$$

Figura 8. Modelo de Westergaard



Fuente: Reyes, 2003

El cálculo de deflexiones en el punto M de coordenadas (x, y) bajo la carga o próxima a ella y el cálculo de los esfuerzos σ_{xy} σ_y en la base de la placa en las direcciones (x, y) ; y en el eje de la carga está dado por las siguientes fórmulas:

Deflexión

$$w_o = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 - \left(\frac{a^2 + b^2 + 4x^2 + 4y^2}{16\pi l^2} \right) \text{Ln} \left[\frac{Eh^3}{k \left(\frac{a+b}{2} \right)^4} \right] - \left[\frac{a^2 + 4ab + b^2}{16\pi l^2} \right] + \left[\frac{(a-b)(x^2 - y^2)}{2\pi l^2 (a+b)} \right] \right\}$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)k}}$$

Donde:

k = Módulo de reacción

w_0 = Es la deflexión

P = Peso de la carga

Esfuerzos

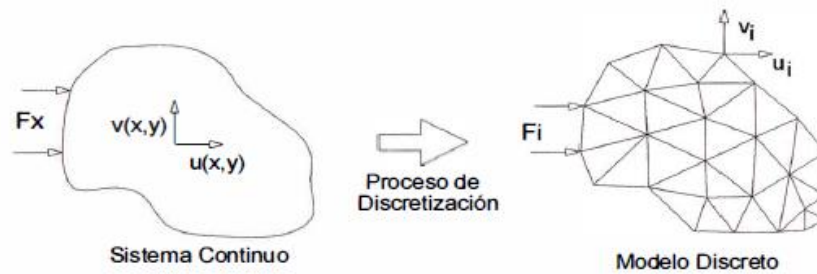
$$\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{3P}{8\pi h^2} \left[(1 + \nu) \text{Ln} \left[\frac{Eh^3}{k \left(\frac{a+b}{2}\right)^4} \right] \mp 2(1 + \nu) \left(\frac{a-b}{a+b}\right) \right]$$
$$\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{P}{h^2} \left[0.275(1 + \nu) \text{Log} \left[\frac{Eh^3}{k \left(\frac{a+b}{2}\right)^4} \right] \mp 0.239(1 + \nu) \left(\frac{a-b}{a+b}\right) \right]$$

2.11.6 Modelo de elementos finitos

Este modelo resuelve las ecuaciones constitutivas y de compatibilidad mediante la división del medio continuo en un conjunto de subdominios denominados elementos finitos. En este método se cumple principalmente las condiciones de frontera en los nodos del sistema que se resuelve.

Los puntos interiores a los elementos se aproximan con funciones de interpolación. En el caso de pavimentos existen programas como MICHIPAVE y EVERSTRESS FE que ayudan a resolver este problema.

Figura 9. Modelo de elementos finitos



2.11.7 Modelo de Hogg

2.11.7.1 Antecedentes del modelo de Hogg

En el año 1944, A.H.A Hogg presentó una solución matemática del modelo que se conoce por su nombre. Este modelo es una extensión del modelo bicapa y cuya solución radica en desarrollar la ecuación diferencial en derivadas parciales que modela un pavimento, esto se logra con ayuda de la transformada de Hankel y los conceptos de “teorías de placas y láminas”.

2.11.7.2 Ventajas y desventajas del análisis de capas

Los modelos antes vistos son de gran ayuda para analizar pavimentos, siguen vigentes y han sido adaptados en programas computacionales para su facilidad de uso. Es evidente que la desventaja presente en el análisis de capas es que no se puede limitar a tener módulos elásticos constantes de los materiales ya que, en el caso de los granulares, estos no siguen un comportamiento lineal; además se tiene el inconveniente de no poder representar el contacto entre capas de materiales adyacentes.

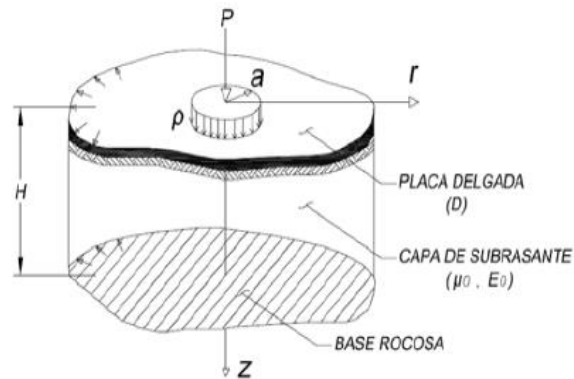
2.11.7.3 Desarrollo de modelo de Hogg

Hogg representa al pavimento en dos capas, una primera capa que es una placa delgada con una cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita apoyada sobre una segunda capa perfectamente áspera, elástica, homogénea e isotrópica de espesor infinito o limitado por una base rígida. La primera capa representa al paquete estructural y la segunda a la sub rasante del pavimento.

Antes de dar la solución que plantea Hogg se debe tener en cuenta los parámetros del modelo y las siguientes suposiciones (Timoshenko y Woionwsky, 1975):

- El plano medio se confunde con la fibra neutra.
- Las secciones planas permanecen planas durante la deformación.
- Los esfuerzos normales que persiguen una deformación transversal pueden despreciarse.
- Los desplazamientos verticales de la fibra neutra de la placa satisfacen la ecuación de Lagrange para placas delgadas.

Figura 10. Modelo de Hogg



Fuente: Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones - Hoffman y Del Águila, 1985

Tabla 3. Parámetros del modelo de Hogg

Parámetros básicos del modelo	$D = \frac{E_p h_p^3}{12(1 - \mu_p^2)}$	Rigidez a la flexión de la placa (t – m)
	$L_0 = \left(\frac{D(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{2(1 - \mu_0)E_{sg}} \right)^{\frac{1}{3}}$	Longitud característica (cm)
	E_{sg}	Módulo de la elasticidad de la subrasante (kg/cm ²)
	μ_0	Módulo de Poisson de la subrasante (adimensional)
	H	Profundidad del estrato rocoso (cm)
Parámetros de evaluación	L_0, E_{sg}, D	Se obtiene conociendo dos valores de deflexiones medidas

Fuente: Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones - Hoffman y Del Águila 1985

2.11.7.4 Ecuación que resuelve Hogg

Anteriormente se comentó que Hogg planteó desarrollar la ecuación diferencial en derivadas parciales como solución a su modelo, la ecuación es la siguiente:

$$D\nabla^4 w = p - \sigma_z$$

$$\sigma_z = E_{sg} \frac{dw}{dr}$$

$$D = \frac{E_p t^3}{12(1 - \mu_p^2)}$$

Donde:

w = Desplazamiento vertical de la fibra neutra

t = Espesor del pavimento

E_p = Módulo de elasticidad del pavimento

E_{sg} = Módulo de elasticidad de la sub rasante

ρ = Suma de presiones verticales $\rho = p - \sigma_z$ o $\rho = -\sigma_z$ en el exterior del círculo

p = Presión del pavimento

En Flores (2012) se tiene el siguiente procedimiento para la solución de la ecuación de Hogg: Terazawa (1926), propone solucionar el problema de Boussinesq por las series de Bessel, obteniendo:

$$w = \int_0^{\infty} W(k) J_0(Kr) dk$$

Así al reemplazar la ecuación en:

$$\sigma_z = E_{sg} \frac{dw}{dr}$$

Se obtiene:

$$\sigma_z = - E_{sg} \int_0^{\infty} m W(m) J_0(mr) dm$$

Y el término $\nabla^4 w$ se puede escribir en coordenadas polares de la siguiente forma:

$$\nabla^4 w = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{d}{dr} \left\{ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right\} \right]$$

Al sustituir la ecuación primera en la expresión anterior se tiene:

$$\nabla^4 w = \int_0^{\infty} m^4 W(m) J_0(mr) dm$$

Si se reemplaza la ecuación en:

$$D\nabla^4 w = p - \sigma_z$$

Se tiene:

$$p = \int_0^{\infty} (Dm^4 + E_{sg}m) W(m) J_0(mr) dm$$

Como p depende de a ($p = f(a)$), es decir $p = \frac{\text{peso del camión}}{\pi a^2}$; esta puede expresarse por series de Bessel, como:

$$p = \int_0^{\infty} P(m) J_0(ma) dm$$

Al comparar la ecuación 17 con la expresión anterior, se tiene:

$$W(m) = \frac{P(m)}{Dm^4 + E_{sg}m}$$

Ahora, la transformada de Hankel produce:

$$P(m) = m \int_0^{\infty} \alpha f(\alpha) J_0(ma) d\alpha$$

Al sustituir las dos expresiones anteriores en la ecuación 14, resulta:

$$w = \int_0^{\infty} \frac{m}{Dm^4 + E_{sg}m} \int_0^{\infty} \alpha f(\alpha) J_0(ma) d\alpha (ma) dm$$

Si la transformada de Hankel (Wyle, 1982) es aplicada a la expresión anterior se obtiene:

$$w = \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr) J_1(ma)}{Dm^4 + E_{sg}m} dm$$

Por último, al introducir condiciones de fronteras (Hogg, 1944) adecuadas a la expresión anterior se tiene:

$$w(r) = \frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)pa}{2(1 - \mu_0)E_{sg}} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{mr}{L_0}\right) J_1\left(\frac{ma}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right)} dm$$

Donde μ_0 , L_0 , E_0 , p están definidos en la tabla 1, “ r ” es la distancia horizontal en la superficie de la placa desde eje de carga y “ ϕ ” viene dado por:

$$\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right) = \frac{\sinh m \cdot \cosh m + \frac{m}{3 - 4\mu_0}}{\sinh^2 m - \frac{m^2}{(3 - 4\mu_0)^2}}$$

2.11.7.5 Características y utilización del modelo

Los pavimentos tienen un comportamiento (performance) superficial y estructural, durante su vida útil pueden sufrir fallas funcionales (superficiales) y fallas estructurales (en el paquete estructural), este tipo de fallas en su estructura tienen influencia en su comportamiento funcional e incitar a fallas superficiales.

Las fallas estructurales son producidas por falta de cohesión entre los materiales que forman el paquete estructural “granular” de tal forma que no puede soportar las cargas de tránsito y también por la falta de resistencia o deterioro de la sub rasante, estas fallas se relacionan con las deformaciones y deflexiones en el pavimento.

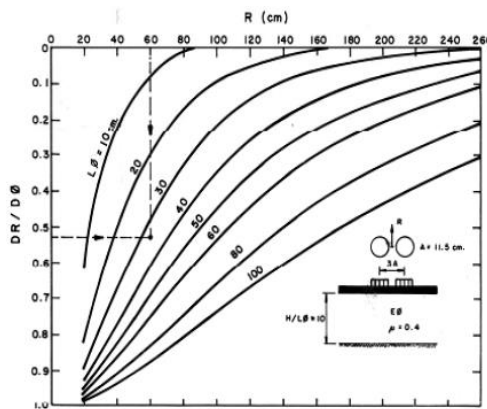
Las deflexiones y deformaciones del pavimento se encuentran relacionadas con los esfuerzos y deformaciones de compresión en la sub rasante, por tal motivo la capacidad portante a la que se encuentra la sub rasante es un indicador significativo del comportamiento de un pavimento.

El modelo de Hogg permite caracterizar los materiales que conforman el sistema pavimento-sub rasante, en base al análisis e interpretación de curvas de deflexiones; para este modelo no se necesita conocer el espesor de las capas, esto es una gran ventaja ya que en muchos pavimentos evaluados es difícil controlar o se desconoce el espesor y las deflexiones teóricas del modelo dependen solo de un parámetro llamado, longitud característica. En conclusión, el modelo de Hogg permite obtener el módulo de elasticidad de la sub rasante y con este valor poder hallar la capacidad portante (CBR) de ella, todo esto es posible a partir de mediciones de deflexiones en la superficie del pavimento;

también permite comparar las deflexiones propias del modelo (teóricas) con las deflexiones medidas por algún ensayo; además, ayuda a establecer una necesidad de refuerzo.

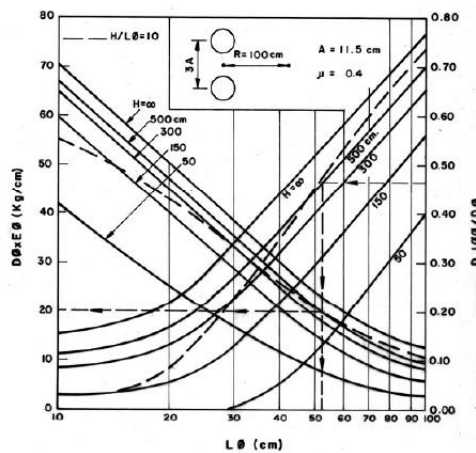
El desarrollo del modelo se basa en el uso de curvas de 2 nomogramas como los presentados en las figuras 11 y 12; con el avance tecnológico hoy es posible obtener soluciones utilizando programas computacionales teniendo como código la solución matemática de la ecuación de Hogg.

Figura 11. Curva de deflexiones - modelo de Hogg



Fuente: Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones - Hoffman y Del Águila 1985

Figura 12. Nomograma para evaluación estructural - modelo de Hogg



Fuente: Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones - Hoffman y Del Águila 1985

En síntesis, normalmente se utilizan modelos para diseñar pavimentos los cuales deben soportar las cargas de tránsito (cálculo directo).

Tabla 4. Ecuaciones para la obtención de parámetros de evaluación

Parámetros de evaluación- método numérico		Ecuación
Módulo de elasticidad de la sub rasante según Hogg.	$E_{SG} = \frac{(1+u_0)(3-4u_0)}{2(1+u_0)} \left[\frac{S_0}{S} \right] \left[\frac{P}{D_0 L_0} \right]$	A
Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión máxima.	$r_{50} = R * \frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} - B}{\left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{D_0}{D_R} - 1\right)\right]^{\frac{1}{\beta}} - B}$	B
Longitud característica de la curva de deflexión.	$L_0 = \frac{y_0 r_{50} + \left[(y_0 r_{50})^2 - 4mAr_{50} \right]^{\frac{1}{2}}}{2}$ $\frac{A}{L_0} < 0.2 \text{ entonces } L_0 = (y_0 - 2m)r_{50}$	C
Relación entre la rigidez por carga puntual y carga distribuida.	$\left(\frac{S_0}{S}\right) = 1 - \bar{m} \left(\frac{A}{L_0} - 0.1\right)$ $\frac{A}{L_0} < 0.2 \text{ entonces } \left(\frac{S_0}{S}\right) = 1$	D

Fuente: Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones - Hoffman y Del Águila 1985

Donde:

E_{sg} = Módulo de elasticidad de la sub rasante

u_0 = Coeficiente de Poisson de la sub rasante

S_0 = Rigidez teórica por carga puntual

S = Rigidez del pavimento = P/D_0 (carga distribuida)

P = Carga aplicada

D_0 = Deflexión máxima

D_R = Deflexión a una distancia radial R

R = Distancia radial desde el punto inicial de carga

r_{50} = Distancia radial donde $\left(\frac{D_R}{D_0}\right) = 0.5$

L_0 = Longitud característica

H = Espesor de la sub rasante

I = Factor de influencia

A = Radio de huella circular

α = Coeficiente de ajuste de curva, ver tabla 5

β = Coeficiente de ajuste de curva, ver tabla 5

B = Coeficiente de ajuste de curva, ver tabla 5

y_0 = Coeficiente para longitud característica, ver tabla 5

m = Coeficiente para la longitud característica, ver tabla 5

\bar{m} = Coeficiente para relación de rigidices, ver tabla 5

Tabla 5. Valor de coeficientes y variables de ajuste de curvas

Ecuación	CASOS		I	II	III
	Profundidad del estrato rígido	h/L_0	10	10	Infinito
	Coeficiente de Poisson	u_0	0.50	0.40	Todos
A	Factor de influencia	I	0.1614	0.1689	0.1925
B	Valores D_R/D_0		> 0.70	> 0.426	Todos
	$r_{50} = f\left(\frac{D_R}{D_0}\right)$	$1/\alpha$	2.460	2.629	3.115
		$1/\beta$	0.592	0.548	0.584
		B	0	0	0
	Valores D_R/D_0		< 0.70	< 0.426	
	$r_{50} = f\left(\frac{D_R}{D_0}\right)$	$1/\alpha$	371.1	2283.4	
$1/\beta$		0.219	0.2004		
B		2	3		
C	$L_0 = f(r_{50}, \alpha)$	y_0	0.620	0.602	0.525
		m	0.183	0.192	0.180
D	$\left(\frac{S_0}{S}\right) = f\left(\frac{A}{L_0}\right)$	\bar{m}	0.52	0.48	0.44

Fuente: Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones - Hoffman y Del Águila 1985

2.11.7.6 Método de Hogg simplificado

En base a la experimentación por muchos años en evaluación de suelos y pavimentos, mediante la medición y análisis de deflexiones con la metodología Hogg-Burmister, se han desarrollado correlaciones entre las propiedades medidas y los parámetros elásticos del sistema suelo-pavimento, lo que ha permitido el desarrollo de un método simple y rápido para ser aplicado en obra con la finalidad de evaluar la capacidad de soporte de los suelos, ya sea a través del Módulo de Resiliencia o del valor del CBR del substrato. Se presenta los conceptos teóricos en que se basa el método propuesto, así como el procedimiento de cálculo que debe seguirse en campo para la obtención de la capacidad de soporte; asimismo, se presentan valores tabulados que facilitan y hacen más rápido el proceso. También se incluyen verificaciones efectuadas aplicando el método riguroso cuyos resultados demuestran la validez y confiabilidad de la nueva herramienta desarrollada. El nuevo método permitirá la completa aplicación del análisis deformacional para la construcción y supervisión de pavimentos, superando de esa manera las limitaciones conocidas que tienen los métodos empíricos para la caracterización de la performance de los pavimentos, así como las dificultades operacionales que presentan los métodos mecanísticos. Este método simplificado facilitará en la práctica la rápida verificación, para condiciones reales de campo, de los valores de soporte asumidos en el diseño del pavimento, así como el adecuado dimensionamiento de la altura de los terraplenes, el aporte y eficiencia de los materiales empleados en su construcción, el efecto de la ubicación del nivel freático en la capacidad resistente de los suelos, entre otros aspectos.

2.11.7.6.1 Correlaciones empíricas

Los investigadores franceses Leger y Autret introdujeron el año 1972 el concepto del producto entre el radio de curvatura y la deflexión máxima, suponiendo que la curvatura era una parábola (3). Por medio del análisis teórico empleando un modelo bicapa elástico, estos investigadores demuestran que el producto $R \times \Delta_{\text{teórico}}$, para un espesor de capas superiores entre 25 y 50 cm, casi no depende del espesor. Por otro lado, en el rango de estos espesores el producto $R \times \Delta$ es una función única y definida del cociente modular E_1/E_2 . De acuerdo a estos conceptos puede usarse entonces el producto $R \times \Delta$ y el valor de

Δ para calcular los parámetros elásticos del pavimento, en particular el módulo de elasticidad de la sub rasante.

En el modelo de Hogg los parámetros que caracterizan la curvatura son la longitud elástica y el parámetro r_{50} . La longitud elástica (l_0), que en la práctica se verifica como la distancia radial en donde se ubica el punto de inflexión del cuenco de deflexiones, es como definición una relación entre la rigidez del pavimento y rigidez de la sub rasante, por lo que su magnitud no puede correlacionarse directamente con la calidad o performance de las capas superiores. El parámetro r_{50} denominado factor de longitud de curva, por el contrario, se ha encontrado que correlaciona bien con la performance de las capas superiores, por lo que se consideró como el parámetro del modelo de Hogg equivalente al radio de curvatura parabólico de Leger y Autret, habiéndose empleado la nomenclatura R_{50} para su denominación en la investigación.

2.11.7.6.2 Ecuación de correlación $D_0 \times R_{50}$ versus E_0

Para el desarrollo de la ecuación de correlación entre el producto $D_0 \times R_{50}$ y el módulo de la sub rasante E_0 , se utilizaron datos obtenidos en ensayos reales de medición de cuencos de deflexiones para un rango amplio de suelos, empleando siempre la carga de un eje estándar de 80 kN, para los cuales se obtuvo el módulo elástico del substrato mediante la aplicación rigurosa del modelo de Hogg. Las corridas del programa de cómputo se realizaron considerando el Caso II de la metodología, es decir, para una profundidad del estrato rocoso igual a $h/10 = 10$ y un coeficiente de Poisson $\mu = 0.40$.

La selección del Caso II para el análisis de los datos de deflexiones se realizó considerando que dicha condición ha sido ampliamente empleada en el Perú y con la que se ha obtenido resultados que siempre han podido ser correlacionados con las condiciones particulares de los suelos en el campo.

Además, es importante señalar que esta consideración concuerda con los resultados obtenidos en los últimos 15 años en el proyecto de investigación de largo alcance sobre performance de pavimentos que se lleva a cabo en EE.UU. desde 1987; de acuerdo a dicha experiencia, se ha encontrado que el Caso II del modelo de Hogg es el que proporciona resultados razonablemente estables para una amplia variedad de tipos de pavimentos y

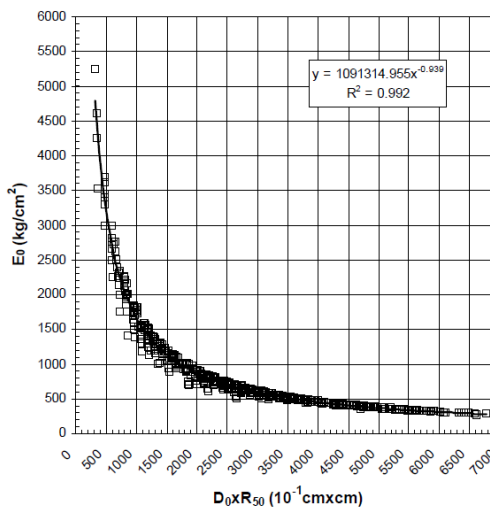
ubicaciones, habiéndose encontrado una alta correlación de estos con los módulos de subrasante determinados por retrocálculo con el programa MODCOMP4, el cual permite la caracterización elástica no-lineal de los suelos y materiales del pavimento.

La ecuación de correlación fue obtenida mediante el análisis de 2,135 pares de datos ($D_0 \times R_{50}$, E_0), en donde $D_0 \times R_{50}$ varía entre 324 y 6778×10^{-1} cmxcm, y E_0 varía entre 260 y 5236 kg/cm^2 . Mediante un análisis de regresión se encontró que la tendencia exponencial demostraba mejor ajuste, encontrándose un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.992$ para la siguiente expresión:

$$E_0 = 1091314.96 * (D_0 * R_{50})^{-0.939}$$

La figura 13 presenta la correlación gráfica establecida, en donde se observa la escasa dispersión que presentan los parámetros analizados, lo que demuestra una casi perfecta correlación que concuerda plenamente con los conceptos descubiertos por Leger y Autret.

Figura 13. Relación $D_0 \times R_{50}$ versus E_0



Fuente: Determinación del módulo resiliente del suelo de fundación mediante método mecanístico – empiricista, Pablo del Águila Rodríguez

2.11.7.6.3 Correlación E_0 versus CBR

Para expresar la capacidad portante del suelo en términos del Valor de Soporte de California (CBR), se puede emplear la conocida correlación establecida por Heukelom, según la cual:

$$E_0 = k \cdot \text{CBR}$$

Donde:

E_0 = Módulo elástico o resiliente (kg/cm^2)

k = Coeficiente de correlación ($k = 100$ para suelos granulares gruesos; $k = 110$ para suelos granulares finos; $k = 130$ para suelos finos plásticos).

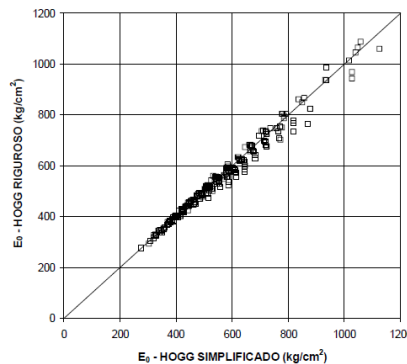
CBR = Valor de Soporte de California (%).

El uso de esta correlación está ampliamente difundida en el espectro tecnológico mundial, y en particular forma parte del procedimiento para la estimación del módulo resiliente en el método para el diseño estructural de pavimentos AASHTO versión 1993.

2.11.7.6.5 Validación de resultados

Para validar los resultados del método se ha efectuado el cálculo del módulo de elasticidad del suelo de sub rasante empleando tanto el método de Hogg, de acuerdo al procedimiento riguroso, así como el método de Hogg simplificado, para los mismos datos de deflexiones. Los resultados de una muestra seleccionada se presentan en la Figura 14, en donde se puede observar que los valores se encuentran ubicados prácticamente sobre la línea de la igualdad, lo cual indica que los resultados obtenidos por los dos métodos pueden considerarse estadísticamente similares, validándose de esa manera la metodología propuesta.

Figura 14. Validación del método de Hogg simplificado



Fuente: Determinación del módulo resiliente del suelo de fundación mediante método mecánico – empiricista, Pablo del Águila Rodríguez

No obstante, la correlación desarrollada para el cálculo simplificado del módulo del suelo, como se ha visto, no depende del espesor de las capas superiores, los usuarios podrán efectuar las verificaciones que crean necesarias en obra para las condiciones propias de cada proyecto en particular, siguiendo el mismo procedimiento que se ha empleado en la investigación, empleando para ello las ecuaciones 1, 2, 3 y 4, asumiendo el Caso II del método de Hogg conforme fue explicado. Asimismo, siendo la intención para el desarrollo del método simplificado que sea empleado únicamente para fines de control rápido en obra, sus resultados siempre podrán ser corroborados mediante el análisis riguroso en gabinete.

2.11.8 Metodología empírica (CONREVIAl)

La deflectometría es el estudio de las deformaciones verticales de la superficie de una calzada, a consecuencia de la acción de una determinada carga o sollicitación.

Los pavimentos al ser sometidos a cargas sufren una deformación elástica, que se recupera al retirar la carga, estas cargas, dependiendo de la frecuencia con que se aplican, pueden producir fatiga del material, con lo cual el material pierde sus propiedades elásticas y se producen deformaciones permanentes, en consecuencia, el criterio para valorar la capacidad estructural se basa en la deformabilidad de las calzadas bajo cargas normalizadas.

La existencia de una correlación entre deflexiones y la presencia o rápido desarrollo de fallas por fatiga y la posibilidad de establecer un orden de valores tolerables en relación al tránsito, constituyen una base para su utilización. La aplicación de estas mediciones permite:

- Determinar la vida útil remanente de un pavimento.
- Evaluar los métodos de diseño de pavimentos y control de ejecución de obras.
- Determinar la condición de un pavimento con miras a su conservación.

En los métodos empíricos las deflexiones convenientemente procesadas se relacionan con los valores admisibles.

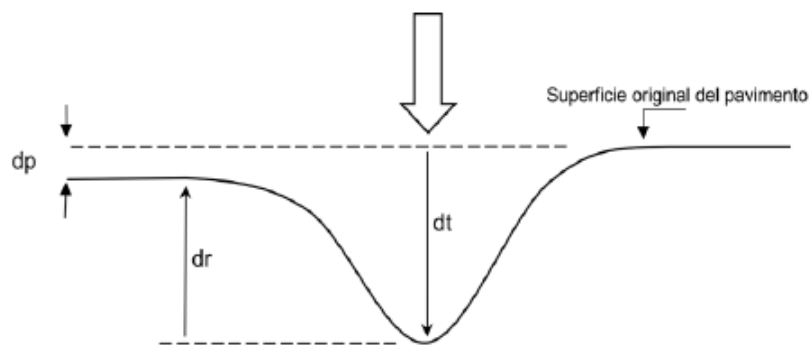
Existe una gran variedad de equipos destinados a medir las deflexiones de un pavimento, encontrándose desde, los más simples y versátiles (viga Benkelman) hasta los más sofisticados y costosos, pero de gran rendimiento operacional (Deflectógrafo La - croix).

La deflexión es parte de carácter elástico, pero también intervienen esfuerzos plásticos. Los primeros desaparecen en cuanto se renueva la carga mientras que los segundos son permanentes y su acumulación a través de las reiteraciones de las cargas produce las distorsiones o ahuellamientos en la superficie del pavimento. Por este motivo se distingue lo siguiente:

- La deflexión total (dt), flecha hacia abajo de la deformación producida por la carga.
- La deflexión recuperable o elástica (dr), flecha hacia arriba de la recuperación de la superficie que se produce al retirar la carga.
- La deflexión permanente o residual (dp), diferencia entre la posición original de la superficie antes de aplicar la carga y después de retirada.

En el estudio de CONREVIAl se ha adoptado el procedimiento canadiense, el cual es coincidente con el del Instituto del Asfalto, que determina la deflexión recuperable del pavimento, en adelante al referirse a deflexión se entenderá se trata de deflexiones recuperables.

Figura 15. Deflexiones



Fuente: Aspectos de evaluación de pavimentos – Consorcio de rehabilitación vial

En la figura 15, se aprecia que bajo la acción de la carga se produce una línea de deflexión cuya magnitud de su curvatura se le denomina “radio de curvatura”, este valor depende

principalmente de los módulos de elasticidad de las capas superiores del pavimento y muy poco de las capas inferiores.

Teniendo en cuenta las características y espesor de las capas asfálticas, se podrán diferenciar dos casos límite:

- Si la mayor parte de la deflexión se produce en la sub rasante, se obtendrán grandes radios de curvatura (en relación con la magnitud de la deflexión).
- Si la mayor parte ocurre en las capas superiores, situación indicativa de la deficiente calidad de éstas, se obtendrán pequeños radios de curvatura aún a veces con deflexiones tolerables.

El método de cálculo del radio de curvatura, se basa en la hipótesis de que la línea de deflexiones de la distancia hasta el eje de carga se aproxima a una parábola hasta una distancia superior a 25cm, sufriendo luego una inflexión hasta tender asintóticamente a la horizontal. La parábola en la zona de máxima curvatura se confunde con el radio en dicho punto, es decir debajo de la acción de la carga que está flexionando el pavimento. El radio de curvatura se expresa de la siguiente manera:

$$R_c = \frac{10 \times 25^2}{2(D_0 - D_{25})} = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})}$$

Donde:

R_c = Radio de curvatura (m)

D_0 = Deflexión recuperable máxima corregida (0.01mm)

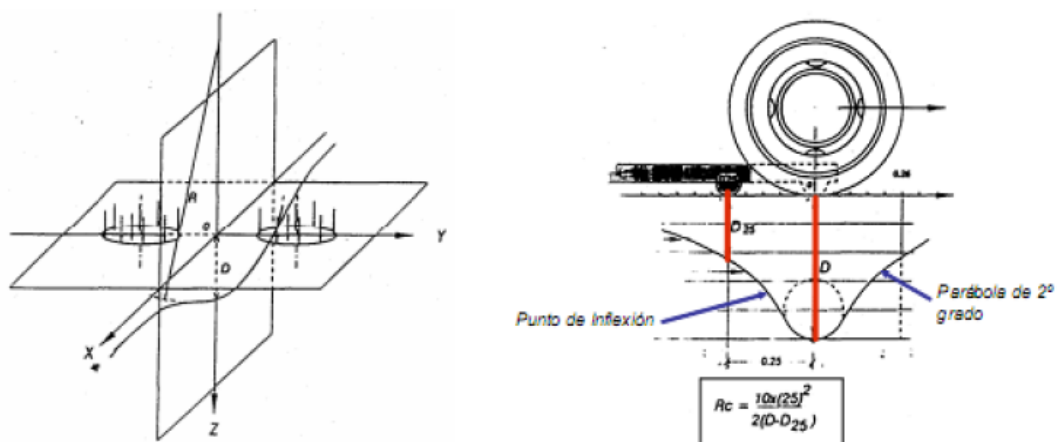
D_{25} = Deflexión recuperable a 25cm corregida (0.01mm)

10 = Coeficiente por cambio de unidades

Las correcciones de las deflexiones son de tres tipos:

- Corrección por relación de brazos (viga Benkelman)
- Corrección por temperatura y
- Corrección por estacionalidad

Figura 16. Deformada del pavimento



Fuente: Aspectos de evaluación de pavimentos – Consorcio de rehabilitación vial

Corrección por relación de brazos (viga Benkelman), es la corrección debido a la aplicación del factor de relación de brazos que tiene la viga Benkelman, este factor se mide directamente del instrumento y dicho se multiplica a la deflexión recuperable para corregirla, se le denotará por **Rb**.

Corrección por temperatura, la temperatura del pavimento afecta las deflexiones recuperables, de tal forma que los datos tomados en un mismo punto a diferentes temperaturas indicarán resultados diferentes, la magnitud de la deflexión aumenta con el incremento de la temperatura de las capas asfálticas, debido a la disminución de la rigidez de las mezclas bituminosas, por lo que el efecto dependerá del espesor de dichas capas y de la rigidez de las capas subyacentes.

De esta manera, para poder comparar entre deflexiones de un mismo tramo obtenidas a diferentes temperaturas, las deflexiones son corregidas y llevadas a una temperatura estándar o de referencia de 20°C, para lo cual se utilizará la metodología de la División Nacional vial de Argentina, cuya fórmula de cálculo es la siguiente:

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

Donde:

$D_{(20^{\circ}\text{C})}$ = Deflexión recuperable a la temperatura estándar 20°C (0.01mm)

D_t = Deflexión recuperable a la temperatura “t” (0.01mm)

$K = 1 \times 10^{-3}$; constante para capas granulares (1/ cm x °C)

t = Temperatura de la carpeta asfáltica del pavimento (°C)

e = Espesor de la carpeta asfáltica (cm)

Corrección por estacionalidad, para una apropiada evaluación de las deflexiones se considera evaluar las deflexiones en el período más desfavorable del año, para tener en cuenta esta circunstancia existe la alternativa de establecer el factor de corrección en forma subjetiva con conocimiento del clima de la región y del comportamiento de pavimentos flexibles en ella.

El estudio asume el criterio de que las condiciones más críticas deben limitarse al régimen de lluvias, distinguiendo básicamente entre estación seca y lluviosa.

Tabla 6. Factor de corrección por estacionalidad

Tipo de suelo sub rasante	Estación lluviosa	Estación seca
Arenosa – permeable	1.0	1.1 a 1.3
Arcilla – sensible al agua	1.0	1.2 a 1.4

Fuente: Aspectos de evaluación de pavimentos – Consorcio de rehabilitación vial

Todas las correcciones anteriores permiten que las deflexiones sean procesadas y con ellas realizar una distribución de frecuencias que se asemeje a una distribución normal, asumiendo que se hallan distribuidas de acuerdo a la ley de Gauss se determina la deflexión media (\bar{D}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (Cv), para ello se usan las siguientes expresiones donde “n” es el número de datos:

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

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

$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{D}} \times 100$$

Donde:

\bar{D} = Deflexión media (0.01mm)

D_i = Deflexión recuperable máxima corregida (0.01mm)

n = Número de datos

σ = Desviación estándar

C_v = Coeficiente de variación

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

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

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

Donde:

D_c = Deflexión característica

\bar{D} = Deflexión promedio de los valores de D_0

σ = Desviación estándar

t = Coeficiente porcentual del área con probabilidad de superar D_c

Considerando que cada deflexión media representa una cierta extensión o área de pavimento, cada valor de “t” corresponderá a un porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la característica D_c correspondiente. En la siguiente tabla se indican los valores más frecuentes:

Tabla 7. Ecuaciones de deflexión característica

Valor diseño %	Deflexión característica D_c	Extensión de pavimento con $\bar{D} > D_c$
50	\bar{D}	50
75	$\bar{D} + 0.674 * \sigma$	25
85	$\bar{D} + \sigma$	15
90	$\bar{D} + 1.3 * \sigma$	10
95	$\bar{D} + 1.645 * \sigma$	5
98	$\bar{D} + 2 * \sigma$	2
99	$\bar{D} + 2.33 * \sigma$	1
99.9	$\bar{D} + 3 * \sigma$	0.1

Fuente: Aspectos de evaluación de pavimentos – Consorcio de rehabilitación vial

La deflexión característica luego de ser determinada se tiene que comparar con un parámetro que sirva de juicio en la determinación de la capacidad estructural del pavimento, este parámetro se denomina deflexión admisible.

Deflexión admisible

La deflexión admisible está definida en función al tráfico de diseño que establece un límite para la deflexión característica, durante un periodo considerado.

La deflexión es un parámetro utilizado para la verificación de la capacidad estructural de un pavimento. Algunos métodos empíricos proponen el uso de fórmulas para el cálculo de la deflexión admisible, se le puede definir como la deflexión tolerable del pavimento, esta es utilizada para determinar si la estructura del pavimento brinda un soporte estructural adecuado a la serviciabilidad de los usuarios.

Podemos mencionar algunas fórmulas empleadas para calcular la deflexión admisible.

- De acuerdo con el criterio de CONREVIAl que utiliza la siguiente expresión

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

- De acuerdo con el criterio del Instituto de Asfalto

$$D_{adm} = 25.64 N^{-0.2383}$$

- De acuerdo con el criterio California, para un espesor de concreto asfáltico existente de 5.00 cm.

$$D_{adm} = 6.237 N^{-0.165}$$

Donde:

D_a = Deflexión característica admisible (inicial) en mm.

N_{18} = Número de ejes estándar equivalentes de 8.2 ton acumulados en millones

Estas fórmulas por ser empíricas son muy sensibles a parámetros como el tráfico de la vía, espesor de carpeta asfáltica y características de los materiales y son de aplicación para la zona y condiciones de carga bajo las cuales han sido desarrolladas.

Deflectograma

Los deflectogramas son un elemento fundamental para el análisis de la variabilidad de la capacidad estructural, donde se puede diferenciar secciones de distinta capacidad estructural en un mismo tramo, de esta manera se identifica secciones de diferente capacidad estructural y/o comportamiento, las que posteriormente serán procesadas estadísticamente.

Una vez finalizado con todos los procesamientos se requiere realizar un análisis de los resultados, que permita establecer la capacidad estructural del pavimento, este análisis se basa en los criterios de juicio de la capacidad estructural del pavimento.

Como resultado de este análisis se llega a establecer la necesidad y tipo de rehabilitación requerida, distinguiéndose tres situaciones representativas que pueden resumirse:

- Estructura adecuada: requiere mejora superficial

- Estructura fatigada: requiere un refuerzo estructural
- Estructura deficiente: requiere reconstrucción parcial o total

Para llegar al juicio sobre la capacidad estructural del pavimento de un tramo, se ha adoptado un criterio racional que combina tres factores principales:

- La apariencia de la superficie en relación a la observación de fallas (particularmente de carácter estructural) de acuerdo a los resultados de la inspección visual.
- La deflexión recuperable del pavimento, como parámetro indicativo de la respuesta mecánica del mismo, complementado con el radio de curvatura de la deflexión.
- La estructura del pavimento, determinada en base a los sondeos y antecedentes disponibles, tomando en consideración espesores y calidad de las capas del pavimento, calidad del suelo de la sub rasante, drenaje, etc.

Estos criterios llegan a establecer casos típicos, la diferenciación de estos puede llevarse a cabo relacionando las respuestas a las siguientes preguntas:

- ¿La deflexión característica de diseño resulta superior o igual / inferior a la admisible para el tránsito previsto? (Deflexiones).
- ¿Hay fallas de origen estructural o se limitan a fallas superficiales? ¿De qué tipo? (Inspección visual).
- ¿Existe una capa débil inmediatamente debajo de las capas asfálticas? (Estructura – Radios de curvatura).

2.12 Forma de medición de la deflexión.

2.12.1 Medición de deflexión estática o de movimiento lento

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

Los equipos más utilizados son:

2.12.1.1 Viga Benkelman

La metodología interpretativa de la viga Benkelman consiste básicamente en comparar las curvas de deflexiones medidas con las curvas de deflexiones teóricas, obtenidas

"cargando" el modelo de Hogg con la misma configuración y magnitud de carga utilizada en los ensayos de campo. La concordancia entre una curva experimental con algunas de las teóricas, corresponde generalmente a una única combinación de parámetros elásticos del modelo, que de esa manera pasan a caracterizar al pavimento evaluado. La metodología se complementa con otros conceptos de la teoría de capas elásticas y con observaciones experimentales para determinar ciertas propiedades de ingeniería de los materiales que pueden usarse para establecer las necesidades de refuerzo.

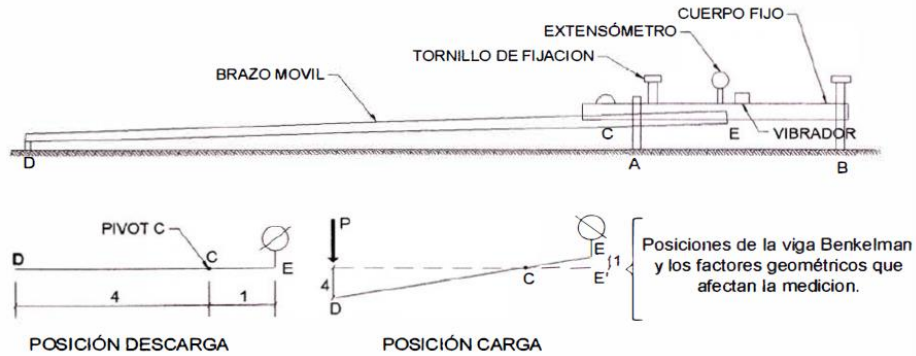
También dentro de la metodología de la viga Benkelman existen valores característicos de deflexiones en pavimentos, como las deflexiones medidas en los ensayos (D_0) y la rigidez relativa (L_0) entre un pavimento y su sub rasante, los cuales se pueden utilizar para establecer relaciones cualitativas entre las características de la curva de deflexiones y el sistema pavimento-sub rasante.

La base matemática de la viga Benkelman, lo constituye el Modelo de Hogg, en donde en el año 1944, A.H.A. Hogg presentó la solución matemática del modelo que se conoce por su nombre. Este modelo representa al pavimento como una placa delgada con una cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita, sustentada por una capa elástica homogénea e isotrópica, de espesor que puede ser infinito o limitado por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa.

La viga Benkelman funciona mediante el principio de palanca. Es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple, según se esquematiza en la figura 17. A su vez la viga consta principalmente de dos partes, un brazo móvil y un brazo fijo que giran sobre un pivote.

Para la toma de medidas de las deflexiones se debe tener presente que el extremo del brazo móvil (O) es el que varía debido a la carga del vehículo, esta variación es registrada en el extensómetro.

Figura 17. Esquema y principio de operación de la viga Benkelman

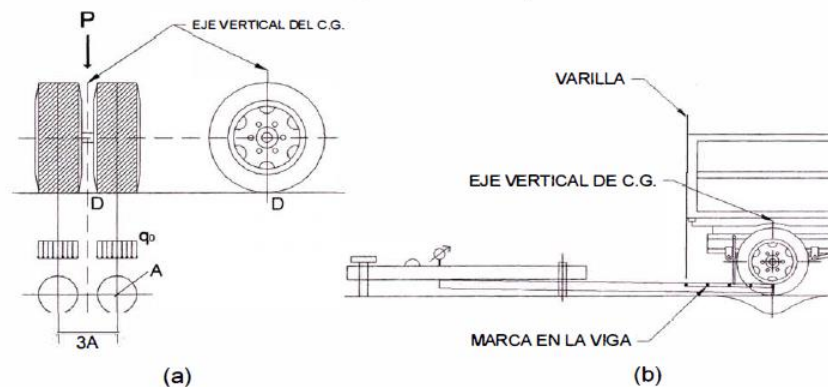


Fuente: Aspectos de evaluación de pavimentos – Consorcio de rehabilitación vial

2.12.1.2 Metodología de medición de deflexiones con viga Benkelman

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada 8200 kg. Previamente a la realización de los ensayos deberá verificarse que se cumpla esta condición, así como que la presión de las llantas sea la requerida. Una vez localizado el lugar donde se realizará el ensayo (usualmente los puntos de medición se localizan en la mitad exterior de un carril), se coloca la llanta a usarse sobre el punto, de manera tal que éste coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto. Estacionados los neumáticos se inserta entre ellos el extremo del brazo móvil de la viga colocándolo nuevamente sobre el punto de ensayo seleccionado. Tomando como punto de referencia una varilla vertical adosada a la parte trasera del camión, se hace coincidir las marcas de la viga con la varilla.

Figura 18. Configuración del sistema de carga en ensayos con viga Benkelman



Fuente: Aspectos de evaluación de pavimentos – Consorcio de rehabilitación vial

Para la metodología de análisis se requiere de por lo menos tres lecturas, pero se pueden obtener más con fines de verificación, lo cual es recomendable si se desea tener una idea gráfica del tipo de curva de deflexión que se produce.

Como norma se realiza la primera marca adicional a una distancia tal que la deflexión que se obtenga en ese punto sea la mitad de la deflexión máxima. La segunda marca adicional se realiza al doble de la distancia de la primera marca adicional.

Una vez instalada la viga en el punto de medición, haciendo coincidir con la varilla vertical y la marca inicial [ver figura 18 (a)], se verifica que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se pondrá el dial del extensómetro en cero, se activará el vibrador y mientras el camión se desplaza muy lentamente se procederá a tomar lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con las marcas [ver figuras (b), (c)]. Cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo de manera que el indicador del dial ya no tenga movimiento (aproximadamente 5.00 m), se efectuará una lectura más.

Para la realización de esta rutina será necesario del concurso de tres operadores:

Un técnico calificado que lea y dicte las lecturas, un operador que anote las mediciones y un ayudante que coordine con el conductor del camión y a la vez dé aviso al técnico que realiza las lecturas.

2.13 Ensayos acelerados en mezclas asfálticas en caliente

2.13.1 Diseño de mezcla asfáltica en caliente

2.13.1.1 Ensayos de caracterización de los agregados

La manera comúnmente empleada de hacer uso del asfalto en laboratorio en la elaboración de carpetas para caminos, es mezclándolo con un agregado pétreo de características conocidas. Sin embargo, no cualquier tipo de agregado pétreo puede emplearse en forma adecuada para formar para formar carpeta. De ahí la necesidad de que conozcamos sus características físicas para saber si es apto o no. Para conocer las características físicas de los agregados que se pretenden emplear en la elaboración de carpetas asfálticas es necesario llevarles a cabo pruebas de laboratorio tales como:

2.13.1.1.1 Granulometría ASTM E 40 AASHTO T27 - 99

Este método de ensayo tiene por objeto determinar, cuantitativamente, los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada. Este método también se aplica usando mallas de laboratorio de abertura redonda, y no se empleará para agregados recuperados de mezclas asfálticas.

Mediante este ensayo se determina la distribución de los tamaños de las partículas de una muestra seca del agregado, por separación a través de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura.

Se usa principalmente para determinar la granulometría de los materiales propuestos para ser utilizados como agregados. Los resultados son usados para determinar el cumplimiento de los requerimientos de las especificaciones que son aplicables, y para suministrar los datos necesarios para la producción de varios productos de agregados y mezclas que contengan agregados.

Los datos pueden también emplearse para desarrollar las relaciones referentes a la porosidad y el acomodamiento.

La determinación exacta de materiales que pasan el tamiz de 75 μm (N° 200) no puede lograrse mediante este ensayo.

Definiciones

- Granulometría

Distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido.

- Porcentaje parcial retenido en un tamiz

Porcentaje en masa correspondiente a la fracción directamente retenida en un determinado tamiz.

- Porcentaje acumulado retenido en un tamiz

Porcentaje en masa de todas las partículas de mayor tamaño que la abertura de un determinado tamiz. Se calcula como la suma del porcentaje parcial retenido en ese tamiz más todos los porcentajes parciales retenidos en los tamices de mayor abertura.

- Porcentaje acumulado que pasa por un tamiz

Porcentaje en masa de todas las partículas de menor tamaño que la abertura de un determinado tamiz. Se calcula como la diferencia entre el 100% y el porcentaje acumulado retenido en ese tamiz.

Tabla 8. Tamaños nominales

Tamaños nominales de abertura	
mm	ASTM
75	(3")
63	(2 1/2")
50	(2")
37,5	(1 1/2")
25	(1")
19	(3/4")
12,5	(1/2")
9,5	(3/8")
6,3	(1/4")
4,75	(N° 4)
2,36	(N° 8)
2,0	(N° 10)
1,18	(N° 16)
0,6	(N° 30)
0,3	(N° 50)
0,15	(N° 100)
0,075	(N° 200)

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales * Asfaltos - Administradora Boliviana de Carreteras

2.13.1.1.2 Peso unitario del agregado ASTM E 30 AASHTO T19M-00

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad aparente de los áridos. Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Definiciones

- Huecos

Espacios vacíos entre las partículas de áridos.

- Poros

Espacios vacíos interiores de una partícula de áridos.

a) Poro accesible: poro permeable o abierto.

b) Poro inaccesible: poro impermeable o cerrado.

- Densidad (ρ)

Es el cociente entre la masa (m) de una sustancia y su volumen (v) a una temperatura especificada. Se expresa en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

a) Densidad aparente (densidad a granel; densidad bruta) (ρ_a). Densidad que considera el volumen macizo de las partículas de un pétreo más el volumen de los poros y de los huecos. Corresponde a la capacidad de la medida que lo contiene.

b) Densidad aparente compactada (ρ_{ac}). Densidad aparente del pétreo compactado en la medida que lo contiene, según los procedimientos indicados en este método.

$$\rho_{ac}(\text{kg/m}^3) = \frac{mc}{V}$$

Donde:

mc = Masa de árido compactado que llena la medida (kg)

V = Capacidad volumétrica de la medida (m^3)

c) Densidad aparente suelta (ρ_{as}). Densidad aparente del pétreo vaciado en la medida que lo contiene, según el procedimiento indicado en este método.

$$\rho_{ac}(\text{kg/m}^3) = \frac{mc}{V}$$

Donde:

mc = Masa de árido suelto que llena la medida (kg)

V = Capacidad volumétrica de la medida (m^3)

Tabla 9. Dimensiones de las medidas

Tamaño máximo nominal del árido (mm)	Capacidad volumétrica		Diámetro interior (mm)	Altura interior (mm)	Espesor mínimo del metal	
	m ³	l			Base (mm)	Pared (mm)
16	0.003	3	155 ± 2	160 ± 2	5	2.5
25	0.010	10	205 ± 2	205 ± 2	5	2.5
50	0.015	15	255 ± 2	295 ± 2	5	3.0
100	0.030	30	355 ± 2	305 ± 2	5	3.0

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales * Asfaltos - Administradora Boliviana de Carreteras

2.13.1.1.3 Peso específico del agregado grueso ASTM E 127 AASHTO T85 – 91

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

Es aplicable a los áridos gruesos de densidad neta entre 2.000 y 3.000 kg/m³, que se emplean en el análisis de suelos, elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Definiciones

Densidad (ρ). Es el cociente entre la masa (m) y el volumen (v) de un material pétreo a una temperatura especificada. Se expresa en kg/m³.

a) Densidad real (ρ_r). Densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas de material árido, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles de esas partículas.

-Densidad real del árido seco (ρ_{rs}). Densidad real en que se considera solamente la masa del árido seco.

-Densidad real del árido saturado superficialmente seco (ρ_{rt}). Densidad real en que se considera la masa del árido seco más la masa del agua que llena los poros accesibles.

b) Densidad neta (ρ_n). Densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas de material pétreo más el volumen de los poros inaccesibles.

Absorción de agua (α). Masa de agua necesaria para llevar un material árido del estado seco al estado saturado superficialmente seco. Se expresa como porcentaje referido a la masa del pétreo seco.

M_{SSS} = Masa del árido saturado superficialmente seco (gr)

2.13.1.1.4 Ensayo de abrasión ASTM E 131 AASHTO T96-99

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

Debido a las condiciones de esfuerzo-deformación, la carga de la rueda es transmitida a la superficie del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante.

Por esta razón los agregados que están en, o cerca de la superficie, como son los materiales de base y carpeta asfáltica, deben ser más resistentes que los agregados usados en las capas inferiores, como la sub base, de la estructura del pavimento, la razón se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de cargas del tránsito.

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los ángulos, ASTM C-131 (para agregados menores de 1 1/2") y ASTM C-535 (para agregados mayores a 3/4"), mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a la abrasión.

$$P (\%) = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} * 100$$

Donde:

P = Pérdida de masa de la muestra

m_i = Masa inicial de la muestra (gr)

m_f = Masa final de la muestra (gr)

Tabla 10. Grado de ensaye definido por sus rangos de tamaños

Tamaño de partículas (mm)	1	2	3	4	5	6	7
	(80 - 40)	(50 - 25)	(40 - 10)	(40 - 10)	(20-10)	(10-5)	(5-2,5)
Tamaño de las fracciones (gr)							
75 - 63	2.500 ± 50						
63 - 50	2.500 ± 50						
50 - 37.5	5.000 ± 50	5.000 ± 25					
37.5 - 25		5.000 ± 50	5.000 ± 25	1.250 ± 10			
25 - 19			5.000 ± 25	1.250 ± 25			
19 - 12.5				1.250 ± 10	2.500 ± 10		
12.5 - 9.5				1.250 ± 25	2.500 ± 10		
9.5 - 6.3						2.500 ± 10	
6.3 - 4.75						2.500 ± 10	
4.75 - 2.36							5.000 ± 10
Masa inicial de muestra (Mi)	10.000 ± 100	10.000 ± 75	10.000 ± 50	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10
Esferas							
Número	12			12	11	8	6
Masa (gr)	5.000 ± 25			5000 ± 25	4584 ± 25	3.330 ± 25	2500 ± 25
Número de revoluciones	1000			500			

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales * Asfaltos - Administradora Boliviana de Carreteras

2.13.1.1.5 Índice de aplanamiento y alargamiento de agregados NTL 354

Este método describe el procedimiento que debe seguirse, para la determinación de los índices de aplanamiento y de alargamiento, de los árido que se van a emplear en la construcción de carreteras.

De acuerdo con este método, se define como índice de aplanamiento de una fracción de árido, el porcentaje en peso de las partículas que la forman cuya dimensión mínima (espesor) es inferior a 3/5 de la dimensión media de la fracción.

Se define como índice de alargamiento de una fracción de árido, el porcentaje en peso de las partículas que la forman cuya dimensión máxima (longitud) es superior a 9/5 de la dimensión media de la fracción.

Este método no es aplicable a las fracciones del árido con tamaño inferior a 6,3 mm (1/4").

Tabla 11. Dimensiones de los calibradores para espesor y longitud

Tamices				Dimensiones del calibrador (mm)	
Pasa		Retiene		Aplanamiento (abertura de la ranura)	Alargamiento (separación de las barras)
mm	(pulg)	mm	(pulg)		
63	(2½")	50	(2")	33,9	--
50	(2")	37,5	(1½")	26,3	78,8
37,5	(1½")	25,0	(1")	18,8	56,3
25,0	(1")	19	(¾")	13,2	39,6
19	(¾")	12,5	(½")	9,5	28,4
12,5	(½")	9,5	(⅜")	6,6	19,8
9,5	(⅜")	6,3	(¼")	4,7	14,2

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales * Hormigones - Administradora Boliviana de Carreteras

Índice de aplanamiento

$$\% \text{ Índice de aplanamiento} = \frac{\text{Peso de las partículas que pasan (mi)}}{\text{Peso retenido (Ri)}} * 100$$

$$\% \text{ Índice de aplanamiento global} = \frac{\sum \text{Masa pasan}}{\sum \text{Masa total}} * 100$$

Índice de alargamiento

$$\% \text{ Índice de alargamiento} = \frac{\text{Peso de las partículas que pasan (mi)}}{\text{Peso retenido (Ri)}} * 100$$

$$\% \text{ Índice de alargamiento global} = \frac{\sum \text{Masa pasan}}{\sum \text{Masa total}} * 100$$

2.13.1.1.6 Equivalente de arena ASTM D 2419 AASHTO T176 - 00

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm). El término “equivalente de arena” transmite el

concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos.

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

Este método proporciona una manera rápida de campo para determinar cambios en la calidad de agregados durante la producción o colocación.

$$\text{Equivalente de arena (EA)} = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} * 100$$

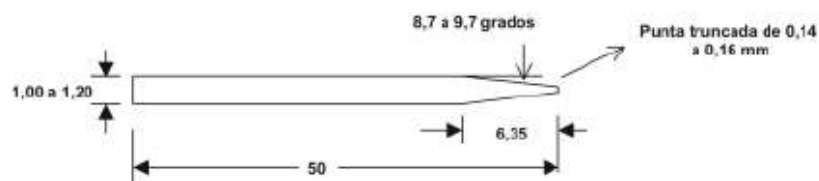
2.13.1.2 Ensayos de caracterización del cemento asfáltico

2.13.1.2.1 Penetración ASTM D 5 AASHTO T49-97

El ensayo de penetración es un método empírico usado para medir la consistencia del cemento asfáltico. Por lo general la penetración se mide a 25°C que es el promedio de las temperaturas de servicio del pavimento.

El ensayo de penetración consiste en colocar una muestra de asfalto en un recipiente estándar a una temperatura de 25°C, controlado por un baño de agua. La muestra es penetrada por una aguja de 100 gr. por 5 segundos. La profundidad de penetración se mide en décimas de milímetro (dmm) que son las unidades de penetración. Por ejemplo, si la aguja penetra 8 mm, la penetración del asfalto es 80.

Figura 19. Aguja para ensayo de penetración



Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales * Asfaltos - Administradora Boliviana de Carreteras

Tabla 12. Máxima entre mediciones

Penetración	0 a 49	50 a 149	150 a 249	250 a 500
Máxima diferencia entre la mayor y la menor determinación	2	4	12	20

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales * Asfaltos - Administradora Boliviana de Carreteras

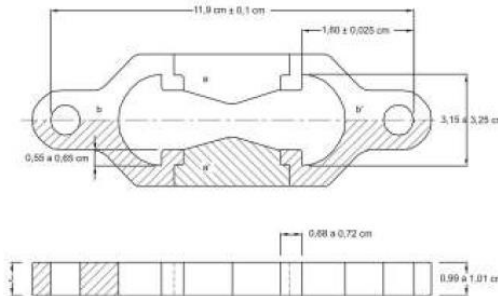
2.13.1.2.2 Ductilidad ASTM D 113 AASHTO T51-00

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm, a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra y de la forma descrita se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensaye se efectúa a una temperatura de $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ y a una velocidad de $5 \text{ cm/min} \pm 5\%$. Para otras temperaturas deberá especificarse la velocidad.

Ensaye

Enganche los anillos de cada extremo de los clips a las clavijas del ductilímetro y sepárelos a la velocidad uniforme especificada hasta la ruptura de la briqueta; se permite una tolerancia de $\pm 5\%$ para la velocidad especificada. Mida la distancia en cm entre los clips traccionados en el momento de producirse la ruptura. Durante el desarrollo del ensaye, el agua en el estanque del ductilímetro cubrirá la briqueta a lo menos 2,5 cm y ésta se mantendrá continuamente a la temperatura especificada con una tolerancia de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Figura 20. Molde para ensayo de ductilidad



Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales * Asfaltos - Administradora Boliviana de Carreteras

2.13.1.2.3 Puntos de inflamación y combustión ASTM D 1 310-01 AASHTO T79-96

El método define la determinación de los puntos de inflamación y combustión por medio de la copa abierta de Cleveland, para productos del petróleo y otros líquidos, Excepto aceites combustibles y materiales que tienen un punto de inflamación por debajo de 79°C determinado por medio de este método de ensaye.

La copa del ensayo se llena con la muestra hasta un nivel especificado. Se aumenta rápidamente la temperatura inicial de la muestra y luego a una llama constante y lenta, a medida que se aproxima al punto de ignición. A intervalos de tiempo especificados se pasa una pequeña llama de ensayo a través de la copa. La temperatura más baja a la cual la aplicación de la llama de ensayo haga que se incendien los vapores que se encuentran por encima de la superficie del líquido, se toma como el punto de ignición. Para determinar el punto de llama, se continúa la aplicación de la llama de ensayo hasta cuando ésta haga que el aceite se quemé por lo menos durante 5s.

2.13.1.2.4 Peso específico ASTM D71-94 AASHTO T229-97

Este método establece el procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos, mediante el uso de picnómetro a la temperatura requerida.

Caliente una pequeña cantidad de material hasta una condición fluida, mediante la aplicación de calor en forma suave; debe prevenir la pérdida por evaporación. Una vez que la muestra esté suficientemente fluida viértala dentro del picnómetro, limpio y seco, hasta aproximadamente la mitad.

Es conveniente calentar ligeramente el picnómetro antes de vaciar el material. Se deben tomar precauciones para evitar que el material toque las paredes del picnómetro por encima de su nivel final, y evite la inclusión de burbujas de aire, aplicando ligeramente la llama de un mechero a la superficie del picnómetro y del asfalto. Enfríe el picnómetro y termine de llenar con agua destilada, inserte la tapa firmemente, sumérgalo completamente en un vaso lleno de agua destilada y colóquelo en el baño, de acuerdo a lo indicado en 2, a la temperatura de ensaye por unos 30 min. Retire el picnómetro del vaso y séquelo con un paño. Determine la masa y désignela como D, aproximando a 0,01 g.

Determine la densidad del asfalto de acuerdo a la fórmula: su contenido a temperatura ambiente y determiné la masa con la tapa incluida. Designe esta masa como C, aproximando a 0,01 g.

$$\rho_b = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} * \rho_w * 1000$$

Donde:

ρ_b = Densidad del agua a la temperatura de ensaye (gr/cm³)

ρ_w = Densidad del asfalto a la temperatura de ensaye (kg /m³)

2.13.1.1 Diseño granulométrico

La distribución de partículas debe encontrarse dentro de los límites especificados por normas, por ello se hace un ensayo a los agregados y se distribuye los porcentajes para ajustarse dentro de los rangos límites.

Tabla 13. Gradación propuesta ASTM D 3515

Abertura de malla	Mezcla cerradas								
	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2'	1 ½'	1'	¾'	½'	3/8	N°4	N°8	N°16
	Graduaciones para mezclas de agregados (grueso, fino, filler)								
2 ½'	100								
2'	90 - 100	100							
1 ½'		90 - 100	100						
1'	60 - 80		90 - 100	100					
¾'		56 - 80		90 - 100	100				
½'	35 - 65		56 - 80		90 - 100	100			
3/8'				56 - 80		90 - 100	100		
N°4	17 - 47	23 - 53	29 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100		100
N°8	10 - 36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100		95 - 100
N°16							40 - 80		85 - 100
N°30							35 - 65		70 - 95
N°50	3 - 15	4 - 16	5 - 17	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40		45 - 75
N°100							3 - 20		20 - 40
N°200	0 - 5	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10		9 - 20
	Asfalto, porcentaje con respecto total de la mezcla								
	2 - 7	3 - 8	3 - 9	4 - 10	4 - 11	5 - 12	6 - 12	7 - 12	8 - 12

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente -

Asphalt Institute Series Manual

2.13.1.2 Contenido de cemento asfáltico

En la determinación del contenido de cemento asfáltico en el proyecto de las mezclas asfálticas se determinarán:

- Contenido mínimo de cemento asfáltico
- Contenido óptimo de cemento asfáltico

2.13.1.2.1 Contenido mínimo de cemento asfáltico

3.13.1.2.1.1 Procedimiento del área superficial

Este procedimiento es aplicable a materiales graduados que contienen cierta cantidad de finos. Primeramente, conociendo la composición granulométrica del material pétreo, se calcula el contenido de cemento asfáltico empleando el método que continuación se indica. Este método está basado en la estimación de la superficie de los agregados pétreos por cada kilogramo de material. Para hacer dicha estimación, se hace uso de las siguientes constantes de área en metros cuadrados por kilo de material pétreo.

Material pasa malla 1 – ½” y se retiene en ¾”	0.27 m ² /kg mat.
Material pasa malla ¾” y se retiene en N°4	0.41 m ² /kg mat.
Material pasa malla N°4 y se retiene en N°40	2.05 m ² /kg mat.
Material pasa malla N°40 y se retiene en N°200	15.38 m ² /kg mat.
Material pasa malla N°200	53.30 m ² /kg mat.

Cada una de estas constantes se multiplica 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 de 0.0055 a 0.01385, de acuerdo con la rugosidad y la porosidad de los agregados.

Tabla 14. Índice asfáltico - método del área superficial

Material pétreo	Índice asfáltico
Gravas y arenosas 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: Vías de Comunicación - Ing. Carlos Crespo Villalaz

Se considera una absorción como baja a la que es menos de 2%, absorción mediana a la comprendida entre 2% y 4%, absorción alta a la mayor de 4%. El porcentaje de cemento asfáltico calculado debe emplearse únicamente como guía para la determinación práctica por medio de la prueba de compresión axial no confinada.

$$p = 0.41nG + 2.05ng + 15.38nA + 53.30nF$$

Donde:

p = Porcentaje mínimo de cemento asfáltico

n = Índice asfáltico según absorción del material

G = Porcentaje de material entre la malla ¾" y la N°4

g = Porcentaje de material entre la malla N° 4 y la N° 40

A = Porcentaje de material entre la malla N° 40 y la N° 200

F = Porcentaje de material que pasa a la N° 200

3.13.1.2.1.2 Procedimiento basado en la distribución de tamaño de las partículas

Se emplea la siguiente fórmula:

$$p = 0.020*a + 0.045*b + c*d$$

Donde:

p = Porcentaje de C.A. expresado con respecto al peso del material

a = Porcentaje de material retenido en la malla N° 10

b = Porcentaje de material que pasa la malla N° y se retiene en la N° 200

c = Porcentaje que pasa la malla N° 200

d = Coeficiente asfáltico que varía con las características del material

Tabla 13. Índice asfáltico – distribución de tamaño de las partículas

Material pétreo	Índice asfáltico
Gravas y arenas redondeadas de baja absorción	0.15
Gravas angulosas trituradas de baja absorción	0.2
Gravas angulosas o redondeadas de mediana absorción	0.3
Gravas trituradas de alta absorción	0.35

Fuente: Vías de Comunicación - Ing. Carlos Crespo Villalaz

2.13.1.2.2 Contenido óptimo de cemento asfáltico por el método Marshall

Este procedimiento es aplicable a mezclas en caliente con cementos asfálticos que contengan áridos con tamaño máximo absoluto igual o inferior a 25 mm. Se puede usar tanto para el diseño en laboratorio como en el control de terreno, y describe una metodología para determinar el óptimo de asfalto en las mezclas.

2.13.2 Introducción a ensayos acelerados

Por definición un pavimento es una estructura cuyos elementos son capas interdependientes, en donde los esfuerzos se transmiten a través de la superficie de contacto entre ellas, disipándose conforme se profundizan. Los esfuerzos a su vez generan deformaciones cuya magnitud depende de la resistencia o módulo de los materiales de las mismas capas y de las subyacentes. Los elementos de la estructura se apoyan sobre el cimiento, que es el suelo de fundación.

Ante un análisis estructural, el ingeniero ha recurrido a la perforación de calicatas, a la toma de muestras para su ensayo en el laboratorio, y al análisis de cada uno de sus componentes (materiales) por separado, para incorporarlos luego en el sistema (pavimento) y deducir acerca de las características estructurales del mismo. De esta forma

se controlan características esenciales como densidad, cantidad de ligante utilizada, propiedades granulométricas y otros más elaborados.

El uso de ensayos de campo amplía el alcance de la información disponible en cuanto a la condición estructural y funcional de los pavimentos, lo cual permite realizar la gestión y administración de los activos viales ensayados. Estos ensayos de campo reflejan la condición al momento en que se realiza la medición, razón por la cual es particularmente importante dar seguimiento en el tiempo a la forma en que cambia la condición con el paso de los vehículos y el tiempo. Adicionalmente, es de vital importancia contar con la información de demanda a que ha estado sujeta la carretera, información que no se encuentra disponible actualmente.

También hay que considerar que la información obtenida en los diferentes laboratorios de control de calidad de las obras viales no puede ser directamente relacionada con el desempeño de los pavimentos en servicio. Esta separación entre los resultados de laboratorio y la forma en que las estructuras en servicio se desempeñan plantea retos en diferentes niveles, pues no solamente se debe conocer cuál es la relación entre los resultados de laboratorio, sino conocer los diferentes mecanismos de falla que tendrán las estructuras durante su vida de servicio, la vida útil de las estructuras, el beneficio de modificar características específicas de las mismas y la razonabilidad de los costos.

2.13.2.1 Ensayos acelerados de pavimentos

Los países que han mostrado un desarrollo significativo en el área de pavimentos lo han logrado, tradicionalmente, a través de la realización de ensayos en tiempo real, debido a que esta técnica no requiere de grandes equipos especializados para la realización de los ensayos.

Frecuentemente esto puede resultar en inconveniencias a los usuarios, pues tramos de carreteras no pueden ser intervenidos a pesar de presentar altos grados de deterioro o falla completa del mismo. Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que un tramo experimental sólo permite evaluar un grupo de parámetros específicos asociados a dicho tramo. Sin embargo, el interés radica en poder evaluar la variabilidad en resultados, lo que requeriría realizar ensayos en tiempo real en varios tramos con condiciones similares y en poder

evaluar todo el rango de parámetros que afectan el desempeño del pavimento (clima, estructura, materiales, tráfico).

Por este motivo se busca realizar ensayos en tiempo real que capturen el efecto de los distintos factores que afectan el deterioro en los pavimentos.

2.12.1 Definición

Se define como ensayo acelerado de pavimentos aquel estudio donde se aplica una carga controlada sobre un sistema de pavimento con el objetivo de determinar la respuesta y su comportamiento bajo una acumulación de daño acelerado y controlado en un periodo corto de tiempo.

Los ensayos acelerados en pavimentos, pretenden demostrar ser una herramienta valiosa que llena el espacio que hay entre los modelos de comportamiento, pruebas de laboratorio y las pruebas de largo plazo en pavimentos en servicio. Se utilizan para comprender mejor el comportamiento de los pavimentos, tratamiento de materiales alternativos, evaluación de nuevos materiales y aditivos, nuevas técnicas de construcción y nuevos tipos de estructuras. Además, permite una rápida comparación entre las actuales y nuevas prácticas y la capacidad de validar y calibrar modelos con datos de calidad, con mínimo riesgo y relativamente a bajo costo.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE ENSAYOS ACELERADOS Y DEFLEXIÓN EN EL TRAMO DE ESTUDIO

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE ENSAYOS ACELERADOS Y DEFLEXIÓN EN EL TRAMO DE ESTUDIO

3.1 Aplicación de ensayos acelerados en mezclas asfálticas en caliente

3.1.1 Selección de materiales

Para la elaboración y correcto desarrollo de ensayos de laboratorio para el presente trabajo se tiene la obtención de materiales de la “chancadora Charajas” derivada de la institución del Servicio Departamental de Caminos de Tarija SE.DE.CA.

Se encuentra ubicada en la comunidad San José de Charajas, camino a Juntas, de la provincia Uriondo al suroeste del departamento de Tarija.

Este muestreo consta de los siguientes materiales:

Agregados:

- Grava
- Gravilla
- Arena

Cemento asfáltico convencional 85/100 (procedencia Brasil).

3.1.2 Caracterización de los agregados

Para conocer el correcto desempeño de los agregados seleccionados de la chancadora Charajas se realizó su correspondiente caracterización mediante la cual se puede comprobar su calidad, si está dentro de los límites recomendados en cuanto a normas nacionales e internacionales para aceptar o rechazar su empleo en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente que posteriormente, esta misma estará sometida a los ensayos acelerados.

3.1.3 Resumen y evaluación de la caracterización de agregados

Anexo 1

Tabla 15. Resumen de caracterización de los agregados

Ensayo	Valores obtenidos
Peso específico del agregado grueso	
Gravilla	
Peso específico seco (gr/cm ³)	2.63
Peso específico aparente (gr/cm ³)	2.71
% Absorción	1.19
Grava	
Peso específico seco (gr/cm ³)	2.64
Peso específico aparente (gr/cm ³)	2.70
% Absorción	0.93
Peso específico del agregado fino	
Peso específico Seco (gr/cm ³)	2.30
Peso específico aparente (gr/cm ³)	2.53
% Absorción	3.90
Peso unitario de los agregados	
Arena	
Peso unitario suelto (gr/cm ³)	1.57
Peso unitario compactado (gr/cm ³)	1.80
Gravilla	
Peso unitario suelto (gr/cm ³)	1.28
Peso unitario compactado (gr/cm ³)	1.38
Grava	1.38
Peso unitario suelto (gr/cm ³)	1.48
Peso unitario compactado (gr/cm ³)	
Desgaste de los ángeles	
Gravilla (%)	26.10
Grava (%)	22.00
Índice de alargamiento y aplanamiento	
% Alargamiento	71.00
% Aplanamiento	44.00
Equivalente de arena (%)	89.09

Fuente: Elaboración propia

Requisitos para el agregado grueso:

Tabla 16. Requisito según norma para el desgaste de los ángeles

Desgaste de los ángeles	%	AASHTO T – 96
Gravilla	26.10	El agregado grueso no será mayor que 40 % a 500 revoluciones
Grava	22.00	

Requisitos para el agregado fino:

Tabla 17. Requisito según norma para el equivalente de arena

Equivalente de arena	%	AASHTO T – 176
Arena	89.09	El ensayo de equivalente de arena deberá dar mayor que 45 %

3.1.4 Caracterización del cemento asfáltico

Para conocer el correcto desempeño del cemento asfáltico se realizó su correspondiente caracterización mediante el cual se puede comprobar su calidad, si está dentro de los límites recomendados en cuanto a normas internacionales para aceptar o rechazar su empleo en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente que posteriormente, este mismo estará sometida a los ensayos acelerados.

3.1.4.1 Resumen y evaluación de la caracterización del cemento asfáltico

Anexo 2

Tabla 18. Resumen de la caracterización del cemento asfáltico

Ensayo	Valores obtenidos	Rangos establecidos
Penetración (mm)	96	85 – 100
Ductilidad (cm)	105	100 Valor mínimo
Punto de inflamación (°C)	238	232°C Valor mínimo
Combustión (°C)	278	-
Peso específico	1.033	1 – 1.05

Fuente: Elaboración propia

3.1.5 Diseño de mezclas asfálticas

Se presenta la siguiente metodología para el diseño de mezclas asfálticas en caliente donde variando los porcentajes de las distintas granulometrías a los agregados se pueda cumplir los requerimientos de norma respetando los límites mínimos y máximos exigidos en la norma ASTM D3515.

3.1.5.1 Diseño granulométrico

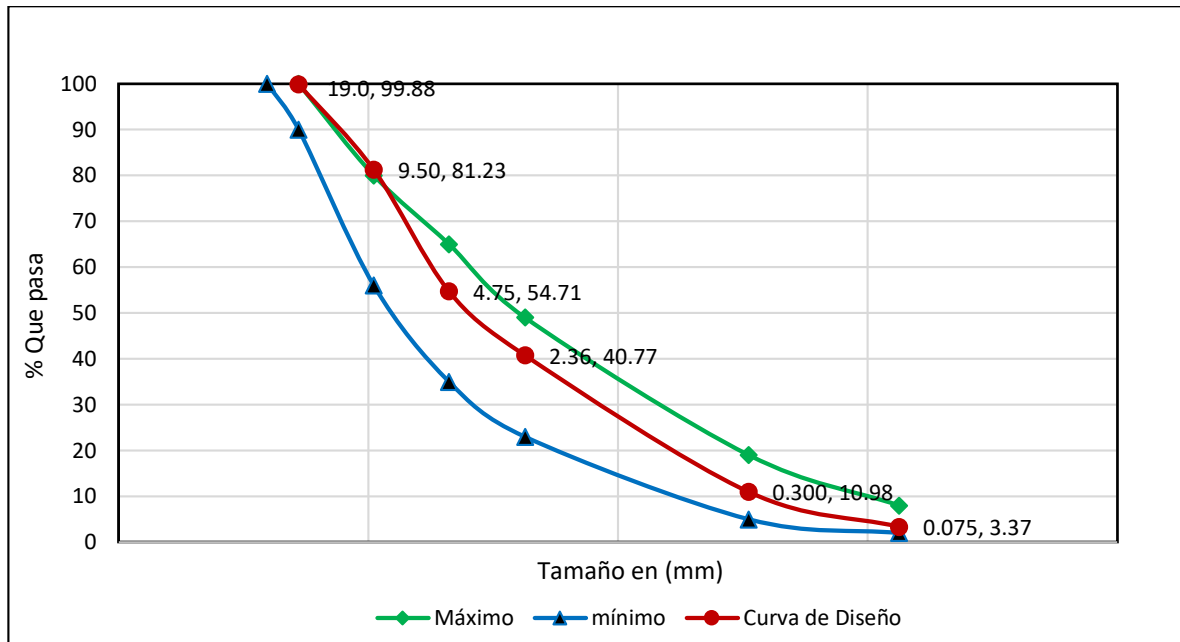
Por cada 3 ensayos realizados a los agregados, se elige solo una granulometría representativa para formar los porcentajes correspondientes para una curva granulométrica de diseño.

Tabla 19. Diseño granulométrico - método Marshall ASTM D 3515

Tamices	Tamaño (mm)	Grava N°2 Peso ret. (gr)	Gravilla N°2 Peso ret. (gr)	Arena N° 1 Peso ret. (gr)	Dosificación			Curva de dosificación				Especificaciones	
					Grava (%) 22.00	Gravilla (%) 28.00	Arena (%) 50.00	Peso ret. 100.00	Ret. acum	% Ret	% Que pasa del total	ASTM D3515	
												Mínimo	Máximo
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	19.0	28.00	0.00	0.00	6.16	0.00	0.00	6.16	6.16	0.12	99.88	90	100
1/2"	12.5	2239.00	0.00	0.00	492.58	0.00	0.00	492.58	498.74	9.97	90.03	-	-
3/8"	9.50	1938.00	48.30	0.00	426.36	13.52	0.00	439.88	938.62	18.77	81.23	56	80
N°4	4.75	790.00	4106.30	4.50	173.80	1149.76	2.25	1325.81	2264.44	45.29	54.71	35	65
N°8	2.36	0.00	828.70	930.50	0.00	232.04	465.25	697.29	2961.72	59.23	40.77	23	49
N° 10	2.00	0.00	0.00	302.50	0.00	0.00	151.25	151.25	3112.97	62.26	37.74		
N°16	1.18	0.00	0.00	934.00	0.00	0.00	467.00	467.00	3579.97	71.60	28.40	-	-
N°30	0.60	0.00	0.00	969.50	0.00	0.00	484.75	484.75	4064.72	81.29	18.71	-	-
N°50	0.30	0.00	0.00	773.00	0.00	0.00	386.50	386.50	4451.22	89.02	10.98	5	19
N°100	0.15	0.00	0.00	465.50	0.00	0.00	232.75	232.75	4683.97	93.68	6.32	-	-
N°200	0.075	0.00	0.00	295.50	0.00	0.00	147.75	147.75	4831.72	96.63	3.37	2	8
BASE	-	5.00	16.70	325.00	1.10	4.68	162.50	168.28	5000.00	100.00	0.00	-	-
	Peso total	5000.0	5000.0	5000.0	1100.00	1400.00	2500.00	5000.0					

Fuente: Elaboración propia

Figura 19. Curva granulométrica método Marshall



Fuente: Elaboración propia

3.1.5.2 Contenido mínimo de cemento asfáltico

Una vez obtenido la granulometría formada se procedió a determinar el contenido mínimo de cemento asfáltico necesario que exige la granulometría formada definitiva donde se toma como referente uno de los procedimientos que hace referencia a la distribución granulométrica.

- Procedimiento de la distribución granulométrica

$$P = 0.020 * a + 0.045 * b + c * d$$

Donde:

- a = 62.26 Porcentaje de material retenido en la malla N° 10
- b = 34.38 Porcentaje que pasa malla N° 10 y se retiene en malla N° 200
- c = 3.37 Porcentaje que pasa la malla N° 200
- d = 0.35 Coeficiente asfáltico (tabla 13)

$$P = 0.020 * 62.26 + 0.045 * 34.38 + 3.37 * 0.35$$

$$P = 3.97 \%$$

Para realizar en ensayo Marshall se procede a preparar muestras de 1200 gr que incluye agregados más cemento asfáltico, se debe preparar seis muestras con diferentes porcentajes de cemento asfáltico a partir de conocimiento del contenido mínimo definido anteriormente siendo la cantidad de cemento asfáltico porcentual las siguientes:

Tabla 20. Porcentajes de cemento asfáltico

C min – 1 %	2.97 %
C min	3.97 %
C min + 0.5 %	4.47 %
C min + 1.0 %	4.97 %
C min + 1.5 %	5.47 %
C min + 2 %	5.97 %

Fuente: Elaboración propia

Por norma de la AASHTO en cada grupo se debe preparar 3 probetas de tal manera que para una prueba completa de Marshall se requiere 18 probetas.

3.1.5.3 Contenido óptimo de cemento asfáltico según granulometría de diseño Porcentaje de materiales para elaboración de las 18 briquetas

Ponderación de grava = 22.00 %

Ponderación de gravilla = 28.00 %

Ponderación de arena = 50.00 %

Peso total de briqueta = 1200 gr

Cemento asfáltico = 2.97 %

Total de agregados = $100 - 2.97 = 97.03$ %

Procedimiento de peso de materiales para un contenido de asfalto de 2.97 %

$$\text{Peso del cemento asfáltico (gr)} = \frac{2.97(\%)*1200}{100 (\%)} = 35.64 \text{ gr}$$

$$\text{Peso general de los agregados (gr)} = \frac{97.03 (\%) * 1200}{100 (\%)} = 1164.36 \text{ gr}$$

$$\text{Peso de la grava (gr)} = \frac{22 (\%) * 1164.36}{100 (\%)} = 256.16 \text{ gr}$$

$$\text{Peso de la gravilla (gr)} = \frac{28 (\%) * 1164.36}{100 (\%)} = 326.02 \text{ gr}$$

$$\text{Peso de la arena (gr)} = \frac{50 (\%) * 1164.36}{100 (\%)} = 582.18 \text{ gr}$$

Resumen general para un contenido de C.A. = 2.97 %

Peso del cemento asfáltico = 35.64 gr

Peso de la grava = 1164.36 gr

Peso de la gravilla = 326.06 gr

Peso de la arena = 582.18 gr

Tabla 21. Porcentajes de cemento asfáltico

	Porcentajes de cemento asfáltico					
	2.97%	3.97%	4.47%	4.97%	5.47%	5.97%
Porcentaje de agregado (%)	97.03%	96.03%	95.53%	95.03%	94.53%	94.03%
Peso del cemento asfáltico (gr)	35.64	47.64	53.64	59.64	65.64	71.64
Peso de grava (gr)	256.16	253.52	252.20	250.88	249.56	248.24
Peso de gravilla (gr)	326.02	322.66	320.98	319.30	317.62	315.94
Peso de arena (gr)	582.18	576.18	573.18	570.18	567.18	564.18
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.1.5.4 Aplicación metodología Marshall

Tabla 22. Datos de laboratorio para metodología Marshall

N°	% C.A.	Altura (cm)	Peso seco (gr)	Peso sup. seco (gr)	Peso sumergido (gr)	Estabilidad (mm)	Fluencia (in)
1	2.97	6.50	1194.60	1195.00	675	507	14
2		6.47	1195.50	1196.30	676	416	15
3		6.53	1182.40	1184.50	669	516	18
4	3.97	6.30	1181.20	1183.80	684	683	20
5		6.33	1191.20	1193.50	686	570	16
6		6.32	1170.90	1173.60	672	645	17
7	4.47	6.21	1178.70	1180.10	683	738	18
8		6.24	1185.80	1188.00	689	723	19
9		6.21	1176.40	1178.40	679	775	19
10	4.97	6.27	1178.00	1180.60	688	736	20
11		6.24	1186.10	1188.90	692	769	21
12		6.16	1186.90	1188.20	690	780	19
13	5.47	6.22	1186.00	1187.50	691	739	20
14		6.18	1162.00	1163.30	678	651	23
15		6.27	1195.40	1196.50	698	687	21
16	5.97	6.22	1163.90	1165.60	678	570	23
17		6.22	1151.80	1155.20	669	609	25
18		6.28	1176.10	1178.30	681	617	24

Fuente: Elaboración propia

Teniendo los datos anteriores se continúa con la determinación del cemento asfáltico óptimo aplicando la metodología descrita en el manual de ensayos – asfaltos por la Administradora Boliviana de Carreteras el cual es el siguiente:

Densidad real seca ponderada de la mezcla de áridos

Material retenido en tamiz N°4

Agregado	P.E.	%
Grava	2.70	22
Gravilla	2.71	28
Arena	2.53	50

Densidad real seca $\rho_{RS} = \%_{1,2,3 \dots n}$ en peso de los áridos * densidad de los áridos $1,2,3 \dots n$

$$\rho_{RS} = \frac{2.70*0.22 + 2.71*0.28}{0.22 + 0.28} = 2.71$$

Material pasa en tamiz N°4

$$\rho_{RS} = \frac{2.71*0.28 + 2.53*0.50}{0.28 + 0.50} = 2.59$$

Peso específico total

$$\rho_{RS} = \frac{100}{\frac{45.29}{2.71} + \frac{54.71}{2.59}} = 2.64$$

Calculo desarrollado para un porcentaje de C.A. de 2.97%

Base mezcla = 2.97 %

$$\text{Base agregado} = \frac{\text{Base mezcla} * 100}{(100 - \text{base mezcla})}$$

$$\text{Base agregado} = \frac{2.97 * 100}{(100 - 2.97)} = 3.06 \%$$

Base agregado = 3.06 %

Altura de probetas

h1 = 6.50 cm, h2 = 6.47 cm, h3 = 6.53 cm

Peso de briqueta

N°	Peso seco (gr)	Peso superficialmente seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)
1	1194.6	1195.0	675
2	1195.5	1196.3	676
3	1182.4	1184.5	669

Volumen

$$V1 = 1195.00 - 675 = 520 \text{ cm}^3$$

$$V2 = 1196.3 - 676 = 520.3 \text{ cm}^3$$

$$V3 = 1184.5 - 669 = 515.5 \text{ cm}^3$$

Densidad de briqueta

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Peso seco (gr)}}{\text{Volumen de probeta (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{Densidad real 1} = \frac{1194.6}{520.0} = 2.30 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Densidad real 2} = \frac{1195.5}{520.3} = 2.30 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Densidad real 3} = \frac{1182.4}{515.5} = 2.29 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Densidad real promedio} = \frac{\text{dr1} + \text{dr2} + \text{dr3}}{3}$$

$$\text{Densidad real promedio} = \frac{2.30 + 2.30 + 2.29}{3} = 2.30 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Densidad máxima teórica} = \frac{100}{\frac{\text{base agregados}}{\text{P.E. del ligante}} + \frac{(100 - \text{base agregados})}{\text{P.E. total agregados}}}$$

$$\text{Densidad máxima teórica} = \frac{100}{\frac{3.06}{1.033} + \frac{(100 - 3.06)}{2.64}} = 2.52 \text{ gr/cm}^3$$

Porcentaje de Vacíos

Porcentaje de vacíos mezcla total

$$\% \text{ de vacíos mezcla total} = \frac{\text{densidad máxima teórica} - \text{densidad promedio}}{\text{densidad promedio}} * 100$$

$$\% \text{ de vacíos mezcla total} = \frac{2.52 - 2.30}{2.30} * 100 = 9.00 \%$$

V.A.M. Porcentaje de vacíos agregado mineral

$$\% \text{ vacíos agregado mineral} = \% \text{ de vacíos mezcla total} + \frac{(\text{densidad promedio} * \text{base mezcla})}{\text{P.E. del ligante}}$$

$$\% \text{ vacíos agregado mineral} = 9.00 + \frac{2.30 * 2.97}{1.033} = 15.60 \%$$

R.B.V. relación betumen vacíos

$$\% \text{ R.B.V.} = \frac{\text{Vacíos agregado mineral} - \text{vacíos mezcla total}}{\text{vacíos agregado mineral}}$$

$$\% \text{ R.B.V.} = \frac{15.60 - 9.00}{15.60} = 42.32 \%$$

Estabilidad Marshall

Nro de probeta	% de asfalto	Lectura del dial
1	2.97	1346
2	2.97	1103
3	2.97	1371

Corrección de carga

$$\text{carga (lb)} = \frac{\frac{\text{lectura del dial}}{102 * 2.2} + 0.0812}{0.012}$$

$$\text{Probeta N° 1 - carga (lb)} = \frac{\frac{1346}{102 * 2.2} + 0.0812}{0.012} = 507 \text{ lb}$$

$$\text{Probeta N}^\circ 2 - \text{carga (lb)} = \frac{\frac{1103}{102 * 2.2} + 0.0812}{0.012} = 416 \text{ lb}$$

$$\text{Probeta N}^\circ 3 - \text{carga (lb)} = \frac{\frac{1371}{102 * 2.2} + 0.0812}{0.012} = 516 \text{ lb}$$

Factor de corrección de altura de probeta

Nro de probeta	% de asfalto	Altura de probeta (mm)	Factor de corrección (tabla 23)
1	2.97	65.0	0.96
2	2.97	64.7	0.97
3	2.97	65.3	0.96

Estabilidad corregida

E. corregida = lectura del dial * factor de corrección dependiendo de la altura de probeta

$$E1 = 1346 * 0.96 = 1295.53$$

$$E2 = 1103 * 0.97 = 1069.91$$

$$E3 = 1371 * 0.96 = 1311.09$$

Tabla 23. Factores de corrección para estabilidad Marshall

Altura (mm)	Factor	Atura (mm)	Factor	Altura (mm)	Factor	Altura (mm)	Factor
51,5	1.435	56,5	1.216	61,5	1.056	66,4	0,936
51,6	1.430	56,6	1.213	61,6	1.053	66,5	0,934
51,7	1.425	56,7	1.209	61,7	1.049	66,6	0,932
51,8	1.420	56,8	1.205	61,8	1.046	66,7	0,930
51,9	1.415	56,9	1.201	61,9	1.043	66,8	0,928
52,0	1.410	57,0	1.198	62,0	1.040	66,9	0,925
52,1	1.405	57,1	1.194	62,1	1.037	67,0	0,923
52,2	1.400	57,2	1.190	62,2	1.035	67,1	0,920
52,3	1.395	57,3	1.187	62,3	1.032	67,2	0,918
52,4	1.390	57,4	1.184	62,4	1.029	67,3	0,915
52,5	1.386	57,5	1.181	62,5	1.027	67,4	0,913
52,6	1.381	57,6	1.178	62,6	1.024	67,5	0,910
52,7	1.377	57,7	1.174	62,7	1.021	67,6	0,908
52,8	1.373	57,8	1.171	62,8	1.019	67,7	0,905
52,9	1.368	57,9	1.168	62,9	1.016	67,8	0,903
53,0	1.364	58,0	1.165	63,0	1.013	67,9	0,900
53,1	1.359	58,1	1.162	63,1	1.011	68,0	0,898
53,2	1.355	58,2	1.159	63,2	1.008	68,1	0,895
53,3	1.351	58,3	1.156	63,3	1.005	68,2	0,893
53,4	1.346	58,4	1.153	63,4	1.003	68,3	0,890
53,5	1.342	58,5	1.149	63,5	1.000	68,4	0,888
53,6	1.338	58,6	1.146	63,6	0,998	68,5	0,886
53,7	1.333	58,7	1.143	63,7	0,995	68,6	0,884
53,8	1.329	58,8	1.140	63,8	0,993	68,7	0,883
53,9	1.324	58,9	1.137	63,9	0,990	68,8	0,881
54,0	1.320	59,0	1.134	64,0	0,988	68,9	0,879
54,1	1.316	59,1	1.131	64,1	0,985	69,0	0,877
54,2	1.311	59,2	1.128	64,2	0,983	69,1	0,875
54,3	1.307	59,3	1.124	64,3	0,980	69,2	0,873
54,4	1.303	59,4	1.121	64,4	0,978	69,3	0,871
54,5	1.298	59,5	1.118	64,5	0,975	69,4	0,869
54,6	1.294	59,6	1.115	64,6	0,973	69,5	0,868
54,7	1.289	59,7	1.112	64,7	0,970	69,6	0,866
54,8	1.285	59,8	1.109	64,8	0,968	69,7	0,864
54,9	1.281	59,9	1.106	64,9	0,965	69,8	0,862
55,0	1.276	60,0	1.103	65,0	0,963	69,9	0,860
55,1	1.272	60,1	1.099	65,1	0,960	70,0	0,858
55,2	1.268	60,2	1.096	65,2	0,958	70,1	0,856
55,3	1.263	60,3	1.093	65,3	0,956	70,2	0,854
55,4	1.259	60,4	1.090	65,4	0,954	70,3	0,853
55,5	1.254	60,5	1.087	65,5	0,953	70,4	0,851
55,6	1.250	60,6	1.084	65,6	0,951	70,5	0,849
55,7	1.246	60,7	1.081	65,7	0,949	70,6	0,847
55,8	1.243	60,8	1.078	65,8	0,947	70,7	0,845
55,9	1.239	60,9	1.074	65,9	0,945	70,8	0,843
56,0	1.235	61,0	1.071	66,0	0,943	70,9	0,841
56,1	1.231	61,1	1.068	66,1	0,941	71,0	0,839
56,2	1.228	61,2	1.065	66,2	0,939	71,138	0,838
56,3	1.224	61,3	1.062	66,3	0,938	71,2	0,836

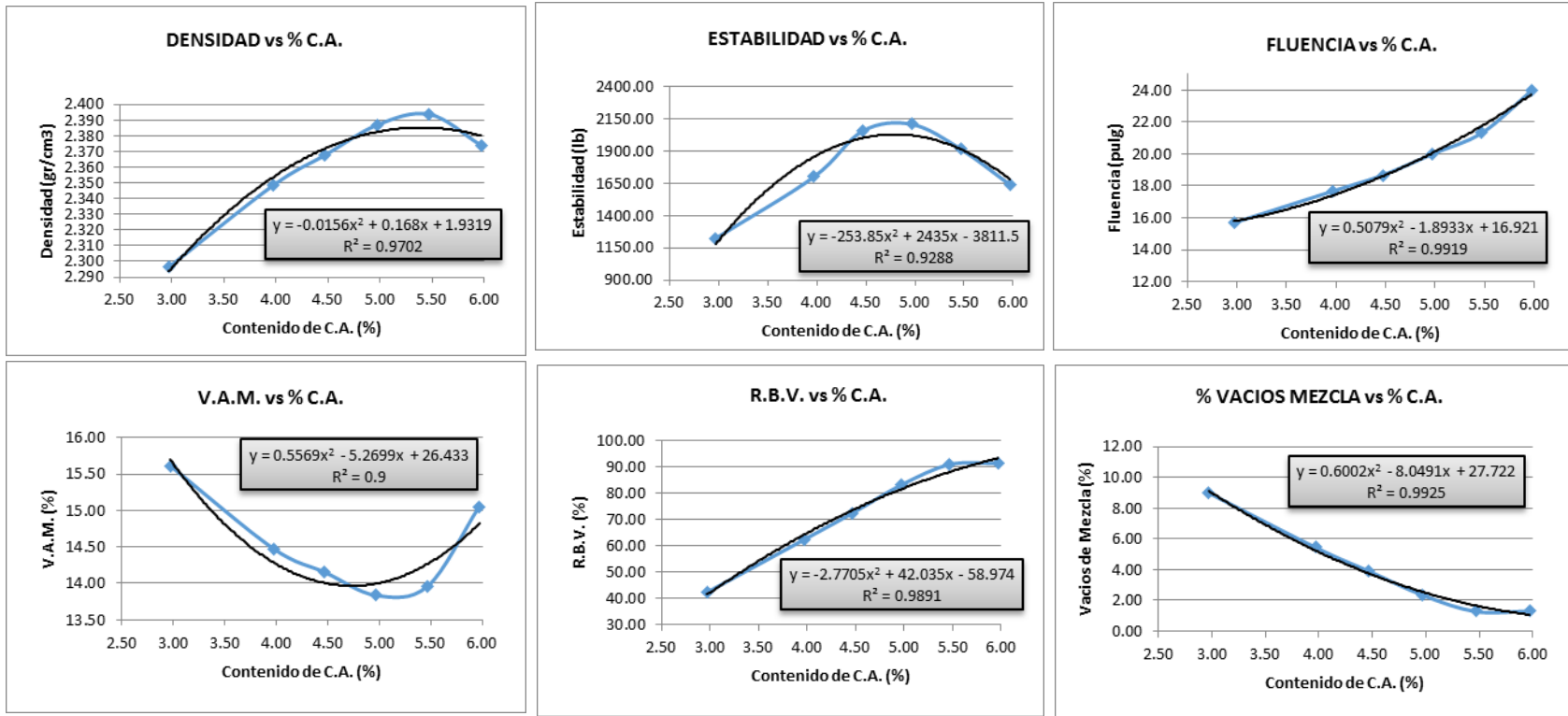
Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales * Asfaltos - Administradora Boliviana de Carreteras

Tabla 24. Resultados de ensayo Marshall

N° de probeta	% de asfalto		Altura de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad briqueta			% de vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia			
	Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	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.
1	2.97	3.06	6.50	1194.6	1195.0	675	520.0	2.30	2.30	2.52	9.00	15.60	42.32	507	1346	0.96	1295.53	1225.5	14	15.67		
2			6.47	1195.5	1196.3	676	520.3	2.30						416	1103	0.97	1069.91		15			
3			6.53	1182.4	1184.5	669	515.5	2.29						516	1371	0.96	1311.09		18			
4	3.97	4.13	6.30	1181.2	1183.8	684	499.8	2.36	2.35	2.48	5.45	14.47	62.35	683	1820	1.01	1843.66	1700.7	20	17.67		
5			6.33	1191.2	1193.5	686	507.5	2.35						570	1518	1.01	1525.59		16			
6			6.32	1170.9	1173.6	672	501.6	2.33						645	1719	1.01	1732.75		17			
7	4.47	4.68	6.21	1178.7	1180.1	683	497.1	2.37	2.37	2.46	3.91	14.15	72.40	738	1970	1.04	2042.89	2057.4	18	18.67		
8			6.24	1185.8	1188.0	689	499.0	2.38						723	1929	1.03	1984.94		19			
9			6.21	1176.4	1178.4	679	499.4	2.36						775	2068	1.04	2144.52		19			
10	4.97	5.23	6.27	1178.0	1180.6	688	492.6	2.39	2.39	2.44	2.35	13.84	83.01	736	1965	1.02	2006.27	2108.8	20	20.00		
11			6.24	1186.1	1188.9	692	496.9	2.39						769	2052	1.04	2127.92		21			
12			6.16	1186.9	1188.2	690	498.2	2.38						780	2082	1.05	2192.35		19			
13	5.47	5.79	6.22	1186.0	1187.5	691	496.5	2.39	2.39	2.42	1.29	13.96	90.78	739	1972	1.04	2041.02	1914.6	20	21.33		
14			6.18	1162.0	1163.3	678	485.3	2.39						651	1735	1.06	1832.16		23			
15			6.27	1195.4	1196.5	698	498.5	2.40						687	1832	1.02	1870.47		21			
16	5.97	6.35	6.22	1163.9	1165.6	678	487.6	2.39	2.37	2.41	1.33	15.05	91.18	570	1516	1.04	1569.06	1640	23	24.00		
17			6.22	1151.8	1155.2	669	486.2	2.37						609	1621	1.04	1677.74		25			
18			6.28	1176.1	1178.3	681	497.3	2.36						617	1642	1.02	1673.20		24			
Especificaciones			mínimo									3	13	75						1800		8
			máximo									5	-	82						-		16

Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Resultados gráficos de ensayo Marshall



Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Valores de cemento asfáltico óptimo

Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall (Lb)	2027.80	4.80
Densidad máxima (gr/cm ³)	2.38	5.38
Vacíos de la mezcla (%)	4.00	5.05
% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%)	5.10

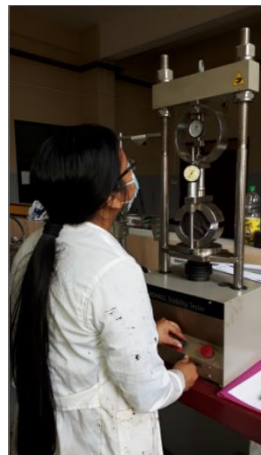
Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Material requerido en la elaboración de briquetas

Material	Porcentaje de material (%)	Peso (gr)
Cemento asfaltico	5.10	61.20
Porcentaje de agregados	94.90	-
Grava	22.00	250.54
Gravilla	28.00	318.86
Arena	50.00	569.40
Peso total de la briqueta		1200

Fuente: Elaboración propia

Imagen 1. Ensayo Marshall



Fuente: Elaboración propia

3.1.6 Datos de ensayos acelerados

Ya elaboradas las briquetas con el contenido óptimo de cemento asfáltico obtenido en el estudio anterior se realiza 20 briquetas, todas con las mismas características estructurales para someterlas a los siguientes ensayos:

3.1.6.1 Briqueta sometida al horno

Teniendo elaboradas las briquetas, estas serán sometidas a una temperatura elevada (180°C) de manera constante por un periodo de 3.5 hr, todo esto mediante un horno de temperatura regulable disponible en laboratorio, para finalizado el ensayo, después de haber experimentado cambios en su estructura de manera acelerada, se debe leer la deformación que presentan estas muestras seleccionadas en el equipo Marshall.

La deformación tiene el objetivo de medir el comportamiento de la mezcla asfáltica ante la presencia de esfuerzo de carga cuya consecuencia es la deformación.

Tabla 27. Datos de laboratorio - horno 180°

Nro. de muestra	Temperatura (°C)	Tiempo (hr)	Lectura deformación (0.01in)
1	180°	3.5	20
2	180°	3.5	14
3	180°	3.5	18
4	180°	3.5	18
5	180°	3.5	20
6	180°	3.5	22
7	180°	3.5	18
8	180°	3.5	20
9	180°	3.5	20
10	180°	3.5	18

Fuente: Elaboración propia

Imagen 2. Ensayo en horno a temperatura regulada



3.1.6.2 Briqueta hervida

Con otro grupo de muestras elaboradas con las mismas características estructurales, estas se las hace hervir por un periodo igual al anterior de 3.5 hr. Después de experimentar cambios en su estructura de manera acelerada se realiza la lectura de deformación en el equipo Marshall.

Tabla 28. Datos de laboratorio - briqueta hervida

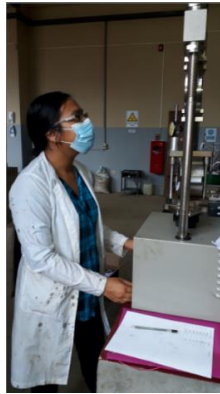
Nro. de muestra	Tiempo (hr)	Lectura deformación (0.01 in)
1	3.5	24
2	3.5	23
3	3.5	20
4	3.5	25
5	3.5	25
6	3.5	22
7	3.5	20
8	3.5	22
9	3.5	25
10	3.5	20

Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. Briquetas hirviendo



Imagen 4. Lectura de deformación en equipo Marshall



3.1.6.3 Resultados de ensayos acelerados

Aplicación de estadística descriptiva

La estadística descriptiva es la rama de la estadística que recolecta, analiza y caracteriza un conjunto de datos con el objetivo de describir las características y comportamientos de este conjunto mediante medidas de resumen, tablas o gráficos.

Se aplica la estadística para conocer el comportamiento que presenta la briqueta ante acciones determinadas, todo el conjunto puesto en estudio presenta las mismas características de elaboración y el contenido de su estructura.

Media aritmética

Definimos media de un conjunto de datos (X_1, X_2, \dots, X_N) al valor característico de una serie de datos resultado de la suma de todas las observaciones dividido por el número total de datos.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N}$$

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{N}$$

Donde:

\bar{X} = Valor de la media aritmética

X_1, X_2, X_3 = Valores de muestras obtenidas

N = Número de muestras

Mediana

La mediana $Me(X)$ es el elemento de un conjunto de datos ordenados (X_1, X_2, \dots, X_N) que deja a izquierda y derecha la mitad de valores.

Si el conjunto de datos no está ordenado, la mediana es el valor del conjunto tal que el 50% de los elementos son menores o iguales y el otro 50% mayores o iguales.

Moda

La moda $Mo(X)$ es el valor más repetido del conjunto de datos, es decir, el valor cuya frecuencia relativa es mayor. En un conjunto puede haber más de una moda.

Desviación estándar

Es una medida de dispersión usada en estadística que nos dice cuánto tienden a alejarse los valores concretos del promedio en una distribución. De hecho, específicamente, el cuadrado de la desviación estándar es “el promedio del cuadrado de la distancia de cada punto respecto del promedio”.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}$$

Donde:

\bar{X} = Valor de la media aritmética

X_i = Valor de cada muestra de observación

N = número de muestras

Valor mínimo

Es el menor valor de una serie de datos.

Valor mayor

Es el mayor valor de una serie de datos.

Amplitud

Es el rango en el cual se encuentran la serie de datos, siendo la diferencia entre el mayor y el menor valor de una serie de datos.

$$\text{Amplitud} = \text{mayor valor} - \text{menor valor}$$

Tabla 29. Resultados de ensayos acelerados - horno 180°

Nro. de muestra	Temperatura	Tiempo	Lectura Deformación	Lectura Deformación	Deformación (mm)
	(°C)	(hr)	(0.01 in)	(in)	
1	180°	3.5	20	0.20	5.080
2	180°	3.5	14	0.14	3.556
3	180°	3.5	18	0.18	4.572
4	180°	3.5	18	0.18	4.572
5	180°	3.5	20	0.20	5.080
6	180°	3.5	22	0.22	5.588
7	180°	3.5	18	0.18	4.572
8	180°	3.5	20	0.20	5.080
9	180°	3.5	20	0.20	5.080
10	180°	3.5	18	0.18	4.572

Fuente: Elaboración propia

Media:

$$\bar{X} = \frac{5.080 + 3.556 + 4.572 + 4.572 + 5.08 + 5.588 + 4.572 + 5.080 + 4.572}{10}$$

$$\bar{X} = 4.78 \text{ mm}$$

Mediana:

Valores de menor a mayor = 3.556, 4.572, 4.572, 4.572, **4.572**, **5.080**, 5.080, 5.080, 5.080, 5.588

$$(4.572 + 5.080) / 2 = 4.826 \text{ mm}$$

Moda:

3.556, 4.572, 4.572, 4.572, 4.572, **5.080**, **5.080**, **5.080**, **5.080**, 5.588

Valor más repetido = 5.080 mm

Varianza y desviación estándar:

Media \bar{X} = 4.78 mm

Deformación (mm)	$(X_i - \bar{X})^2$
5.080	0.090
3.556	1.498
4.572	0.043
4.572	0.043
5.080	0.090
5.588	0.653
4.572	0.043
5.080	0.090
5.080	0.090
4.572	0.043

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}$$

$$S^2 = \frac{0.090 + 1.498 + 0.043 + 0.043 + 0.090 + 0.653 + 0.043 + 0.090 + 0.090 + 0.043}{10 - 1}$$

$$S^2 = 0.30$$

$$s = \sqrt{0.30}$$

$$s = 0.55 \text{ mm}$$

Amplitud:

Amplitud = mayor valor – menor valor

$$\text{Amplitud} = 5.59 - 3.56$$

$$\text{Amplitud} = 2.03 \text{ mm}$$

Tabla 30. Resumen de aplicación de estadística

N	10
Media	4.78
Mediana	4.83
Moda	5.08
Desviación estándar	0.55
Varianza de la muestra	0.30
Amplitud	2.03
Valor mínimo	3.56
Valor máximo	5.59

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Resultado de ensayos acelerados - briqueta hervida

Nro. de muestra	Tiempo	Deformación (0.01 in)	Lectura Deformación (in)	Deformación (mm)
	(hr)			
1	3.5	24	0.24	6.096
2	3.5	23	0.23	5.842
3	3.5	20	0.20	5.080
4	3.5	25	0.25	6.350
5	3.5	25	0.25	6.350
6	3.5	22	0.22	5.588
7	3.5	20	0.20	5.080
8	3.5	22	0.22	5.588
9	3.5	25	0.25	6.350
10	3.5	20	0.20	5.080

Fuente: Elaboración propia

Media:

$$\bar{X} = \frac{6.096 + 5.842 + 5.080 + 6.350 + 6.350 + 5.588 + 5.080 + 5.588 + 6.350 + 5.080}{10}$$

$$\bar{X} = 5.74 \text{ mm}$$

Mediana:

Valores de menor a mayor =

5.080, 5.080, 5.080, 5.588, **5.588, 5.842**, 6.096, 6.350, 6.350, 6.350

$$(5.588 + 5.842) / 2 = 5.72 \text{ mm}$$

Moda:

5.080, 5.080, 5.080, 5.588, 5.588, 5.842, 6.096, 6.350, 6.350, 6.350

Valor más repetido = 5.080 mm

Varianza y desviación estándar:

Media $\bar{X} = 5.74$ mm

Deformación (mm)	$(X_i - \bar{X})^2$
6.096	1.732
5.842	1.128
5.080	0.090
6.350	2.465
6.350	2.465
5.588	0.653
5.080	0.090
5.588	0.653
6.350	2.465
5.080	0.090

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}$$

$$S^2 = \frac{1.732 + 1.128 + 0.090 + 2.465 + 2.465 + 0.653 + 0.090 + 0.653 + 2.465 + 0.090}{10 - 1}$$

$$S^2 = 0.29$$

$$s = \sqrt{0.29}$$

$$s = 0.54 \text{ mm}$$

Amplitud:

Amplitud = mayor valor – menor valor

$$\text{Amplitud} = 6.35 - 5.08$$

$$\text{Amplitud} = 1.27 \text{ mm}$$

Tabla 32. Resumen de aplicación de estadística

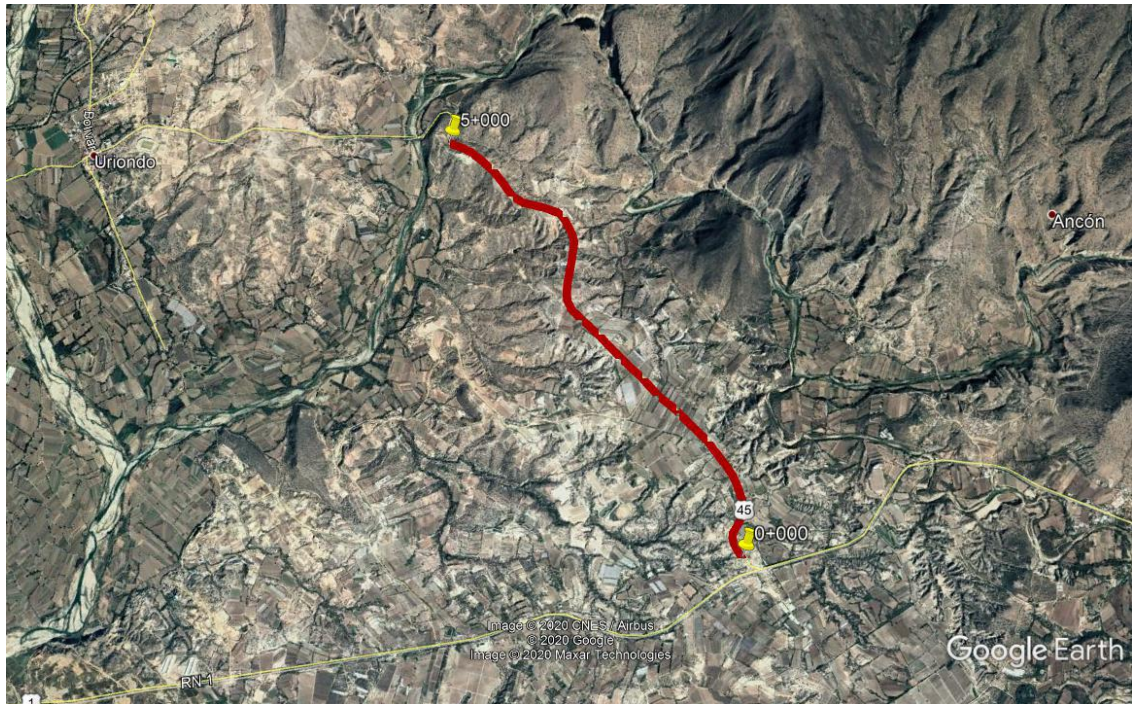
N	10
Media	5.74
Mediana	5.72
Moda	5.08
Desviación estándar	0.54
Varianza de la muestra	0.29
Amplitud	1.27
Valor mínimo	5.08
Valor máximo	6.35

Fuente: Elaboración Propia

3.2 Deflexiones

3.2.1 Ubicación del tramo de estudio

Figura 22. Ubicación del tramo de aplicación



Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

País: Bolivia

Departamento: Tarija

Provincia: Uriondo

Referencias geográficas

Punto inicial: El Cruce

A 17 Km del centro de la ciudad de Tarija

Elevación: 1801 m.s.n.m

Coordenadas geográficas

- Latitud 21°38'6.10"S
- Longitud 64°37'53.74"O

Sistema de coordenadas UTM

- Zona: 20 K
- Coordenada este: 331120.94 m E
- Coordenada norte: 7606661.63 m S

Punto final: Ruta hacia el valle de la concepción

Elevación: 1769 m.s.n.m

- Latitud 21°39'58.12"S
- Longitud 64°39'41.61"O

Sistema de coordenadas UTM

- Zona: 20 K
- Coordenada este: 328076.42 m E
- Coordenada norte: 7603204.76 m S

3.2 Características del tramo de aplicación

La accesibilidad a Uriondo se da mediante una carretera asfaltada hasta la población del valle de Concepción, distante a 25 km de la ciudad de Tarija. Los caminos a las demás comunidades se encuentran en regular estado. En materia de recursos naturales, la región tiene bosques húmedos y bosques secos en sus tres zonas ecológicas: zona aluvial, zona lacustre y pie de monte.

3.2.1 Clima

El clima varía por ser semiárido fresco, con una temperatura media anual de 17.5°C. que varía de temperaturas medias anuales entre (16°C - 20°C) y precipitaciones más abundantes (600 mm anuales).

3.2.2 Tráfico

El camino al valle de la Concepción suele tener una recurrencia bastante amplia, presentándose viajes interprovinciales con transporte liviano y medio.

3.2.3 Datos de deflexiones obtenidos empleando la viga Benkelman

Procedimiento previo

Para la medición de deflexiones en el tramo selecto se debe tener el peso estándar que exige el ensayo que es de 8,2 ton.

- Características de la volqueta

Tipo de eje trasero = eje simple

Rueda tipo = rueda doble trasera

Capacidad de tolva = 8 cubos

Material puesto en tolva: grava que ocupa 4 ½ cubos

- Forma de pesaje

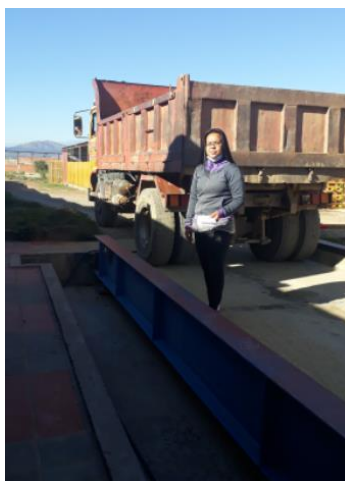
Para tener el peso estándar se procede al pesaje de la volqueta en una balanza electrónica con capacidad de alto tonelaje que esta se encuentra ubicada en las afueras de la zona sur de la ciudad de Tarija, sobre la avenida principal Víctor Paz Estenssoro frente a la nueva terminal de buses.

Imagen 5. Balanza electrónica



Para el correcto pesaje de la volqueta cargada, esta se ubica sobre la balanza y la parte de la cabina perteneciente al eje delantero queda fuera de la balanza y solamente queda el eje trasero y se procede al pesaje, lectura del pesaje e impresión de factura.

Imagen 6. Pesaje de volqueta del eje trasero



- Forma de medición en plataforma con viga Benkelman

El presente proyecto tiene su aplicación en el tramo que inicia desde el denominado “El Cruce” hacia el Valle de la Concepción en sus primeros 5 km.

Una vez definidas las progresivas donde se realizará las lecturas de deflexión del pavimento flexible, se detiene el movimiento de la volqueta y el vehículo que transporta a los técnicos de apoyo y todo el equipo requerido para realizar la práctica como ser la viga Benkelman, flexómetro, termómetro de piso, extensómetro digital, conos para una correcta señalización, entre otros.

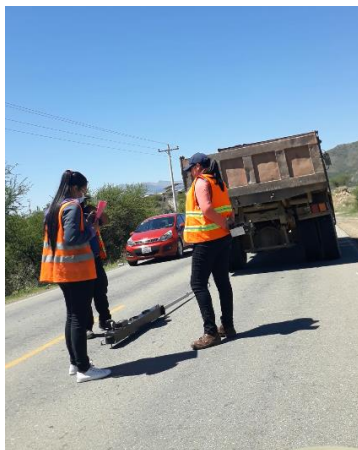
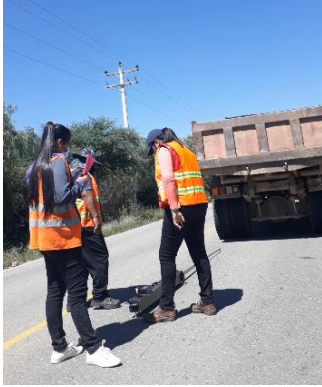
En el eje de gravedad de las llantas dobles de la volqueta se ubica la punta de la viga Benkelman, se empieza a lecturar cuando la volqueta avanza una distancia específica siendo esta primera lectura la deflexión máxima de la progresiva seleccionada.

Este movimiento de la volqueta debe ser lento y a una velocidad constante para llegar al siguiente punto de medición, las siguientes mediciones vienen a ser denominadas deflexiones adicionales.

Se efectúa las mediciones cada 200 m o más por no encontrarse en tramo recto, a lo largo del trayecto presenta curvas.

Se hace lectura de ambos carriles respetando las progresivas respectivas.

Imagen 7. Mediciones de deflexión en el tramo El Cruce - Valle de la Concepción



3.2.3.1 Planilla de campo

Tramo: El Cruce – Valle de la Concepción

Carril: derecha (ida)

Tabla 33. Datos de campo - carril derecho

(N°)	(Km)	Lecturas del dial						Temperaturas		Espesor asfalto (cm)
		L- a 0cm 0.01 mm	L- a 25cm 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	Amb. °C	Asfalto °C	
1	00+000	14	6	4	4	0	0	29.0	32.0	5.0
2	00+300	16	10	4	2	0	0	29.0	32.0	5.0
3	00+600	26	14	8	2	0	0	29.0	32.0	5.0
4	00+800	20	12	4	2	0	0	29.0	40.0	5.0
5	01+000	22	16	10	2	0	0	29.0	40.0	5.0
6	01+200	20	12	6	2	0	0	29.0	40.0	5.0
7	01+400	18	12	8	4	2	0	30.0	40.0	5.0
8	01+600	12	8	6	2	0	0	30.0	44.0	5.0
9	01+800	44	32	22	4	2	0	30.0	44.0	5.0
10	02+000	22	14	8	2	2	0	30.0	44.0	5.0
11	02+200	30	20	8	8	2	0	30.0	44.0	5.0
12	02+400	32	20	14	8	0	0	30.0	44.0	5.0
13	02+600	30	18	12	4	2	0	30.0	44.0	5.0
14	03+000	26	16	8	4	2	0	30.0	45.0	5.0
15	03+200	52	40	20	4	0	0	30.0	44.0	5.0
16	03+500	16	8	6	2	0	0	30.0	47.0	5.0
17	03+800	20	10	6	2	0	0	30.0	46.0	5.0
18	04+100	12	8	6	2	0	0	31.0	46.0	5.0
19	04+400	24	12	6	4	2	0	31.0	46.0	5.0
20	04+600	20	12	8	2	0	0	31.0	47.0	5.0
21	04+800	22	12	10	4	2	0	31.0	47.0	5.0
22	05+000	28	14	8	2	0	0	31.0	47.0	5.0

Fuente: Elaboración propia

Tramo: El Cruce – Valle de la Concepción

Carril: izquierdo (vuelta)

Tabla 34. Datos de campo - carril izquierdo

(N°)	(Km)	Lecturas del dial						Temperaturas		Espesor asfalto (cm)
		L- a 0cm 0.01 mm	L- a 25cm 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	Amb °C	Asfalto °C	
1	05+000	28	16	10	4	0	0	31.0	45.0	5.0
2	04+800	20	10	4	2	0	0	31.0	45.0	5.0
3	04+600	22	12	8	2	0	0	31.0	45.0	5.0
4	04+400	20	12	6	2	0	0	31.0	47.0	5.0
5	04+100	16	10	6	0	0	0	31.0	47.0	5.0
6	03+800	24	16	10	4	2	0	31.0	47.0	5.0
7	03+500	20	10	6	2	2	0	31.0	47.0	5.0
8	03+200	40	28	14	6	2	0	31.0	46.0	5.0
9	03+000	24	10	6	2	0	0	31.0	46.0	5.0
10	02+600	34	18	12	6	2	0	31.0	45.0	5.0
11	02+400	30	16	10	6	0	0	31.0	45.0	5.0
12	02+200	24	12	8	4	0	0	31.0	46.0	5.0
13	02+000	20	10	10	4	2	0	31.0	46.0	5.0
14	01+800	26	10	6	6	0	0	31.0	46.0	5.0
15	01+600	20	14	6	4	2	0	32.0	46.0	5.0
16	01+400	22	12	8	2	0	0	32.0	46.0	5.0
17	01+200	32	18	14	8	2	0	32.0	46.0	5.0
18	01+000	18	10	6	2	0	0	32.0	46.0	5.0
19	00+800	24	12	10	8	2	0	32.0	46.0	5.0
20	00+600	20	10	6	2	0	0	32.0	47.0	5.0
21	00+300	18	10	8	4	2	0	32.0	47.0	5.0
22	00+000	16	6	6	4	0	0	32.0	47.0	5.0

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.2 Procedimiento de cálculo

El cálculo a continuación hace referencia al carril derecho (ida) de las lecturas realizadas y el mismo procedimiento se refleja en el carril izquierdo (vuelta).

Se efectúa la corrección de las deflexiones por efecto de la temperatura, determinando radios de curvatura, deflexión promedio, desviación estándar, coeficiente de variación y deflexión característica, para que esta última sea comparada con la deflexión admisible.

Corrección de las deflexiones por efecto de la temperatura

La temperatura del pavimento afecta a las deflexiones recuperables, de forma tal que, de mediciones realizadas en el mismo punto, pero a distinta temperatura, indicaran resultados diferentes.

Para un pavimento dado, la magnitud de la deflexión aumenta con un incremento en la temperatura de las capas asfálticas. Esto es atribuido a una disminución de la rigidez de las mezclas bituminosas, por lo que el efecto dependerá del espesor de dichas capas y de la rigidez de las capas subyacentes.

Existen procedimientos para evaluar tal corrección y llevar las determinaciones a una temperatura estándar (20°C) de referencia.

Para corregir las deflexiones por efecto de la temperatura se ha aplicado la siguiente fórmula:

Deflexión recuperable para D_0 y D_{25}

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

Donde:

$D_{(20^{\circ}\text{C})}$ = Deflexión recuperable a la temperatura estándar 20°C (0.01mm)

D_t = Deflexión recuperable a la temperatura "t" (0.01mm)

$K = 1 \times 10^{-3}$; constante para capas granulares (1/ cm x °C)

t = Temperatura de la carpeta asfáltica del pavimento (°C)

e = Espesor de la carpeta asfáltica (cm)

Datos

Medición N° 1

Progresiva = 0 + 000

Lectura D_0 (0.01 mm) = 14

Lectura D_{25} (0.01 mm) = 6

Temperatura de asfalto = 32° C

Espesor asfalto = 5.00 cm

Deflexión máxima D_0 (0.01 m)

$$D_{(20^{\circ}\text{C})} = \frac{D_t}{K * (t - 20^{\circ}\text{C}) * e + 1}$$
$$D_{(20^{\circ}\text{C})} = \frac{14}{0.001 * (32^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) * 5 + 1} = 13$$

Deflexión a 25 cm de la deflexión máxima D_{25} (0.01 mm)

$$D_{(20^{\circ}\text{C})} = \frac{6}{0.001 * (32^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) * 5 + 1} = 6$$

Radio de curvatura

La línea de deflexión se aproxima a una parábola hasta una distancia algo mayor de 25 cm del eje de carga, para sufrir luego una inflexión y tender asintóticamente hacia el horizonte. La curvatura de la parábola queda definida por su parámetro, que en la zona de máxima curvatura se confunde prácticamente con el radio del círculo osculador en dicho punto.

Por lo tanto, se considera una deflexión auxiliar a 25 cm, se puede determinar el radio de curvatura con la fórmula siguiente:

$$R_c = \frac{10 * 25^2}{2(D_0 - D_{25})} = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})}$$

Donde:

R_c = Radio de curvatura (m)

D_0 = Deflexión recuperable máxima corregida (0.01mm)

D_{25} = Deflexión recuperable a 25cm corregida (0.01mm)

10 = Coeficiente por cambio de unidades

Datos

D_0 (0.01 mm) Deflexión recuperable máxima corregida = 13

D_{25} (0.01 mm) Deflexión recuperable a 25 cm corregida = 6

$$R_C = \frac{10 \cdot 25^2}{2 \cdot (D_0 - D_{25})} = \frac{6250}{2 \cdot (13 - 6)} = 414.00 \text{ m}$$

Deflexión promedio

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

D_i = Deflexión recuperable máxima corregida (0.01mm)

n = Numero de muestras total

$$\bar{D} = \frac{13 + 15 + 25 + 18 + 20 + 18 + 16 + 11 + 39 + 20 + 27 + 29 + 27 + 23 + 46 + 14 + 18 + 11 + 21 + 18 + 19 + 25}{22}$$

$$\bar{D} = 21.5$$

Los estudios de deflexiones recuperables han demostrado que las deflexiones medidas en una sección de pavimentos, presenta una distribución de frecuencias que se asemeja a una distribución normal.

Por ende, a partir de las deflexiones individuales, asumiendo que se hallan distribuidas de acuerdo a la ley de Gauss se han determinado la deflexión media (\bar{D}), el desvío cuadrático medio o desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (C_v).

El valor de (σ) representa la dispersión de resultados en pavimentos que posean en mismo valor medio \bar{D} , mientras que el coeficiente de variación porcentual indica un mayor o menor grado de dispersión aun cuando las secciones posean distintos valores medio. Dicho coeficiente varia generalmente entre 10 y 40%.

Dado que la desviación estándar aumenta con un incremento de las deflexiones, y mayores deflexiones están asociadas a pavimentos más débiles, puede concluirse que estos son generalmente más variables, y que la deflexión de diseño cuando se la utiliza en algún

método para el cálculo del refuerzo debe basarse tanto en la deflexión media como en la dispersión.

Desviación estándar

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

\bar{D} = Deflexión media (0.01mm)

D_i = Deflexión recuperable máxima corregida (0.01mm)

n = Número de datos

σ = Desviación estándar

Nº	D_i (0.01 mm)	\bar{D} (0.01 mm)	(D_i - \bar{D})² (0.01 mm)
1	13	21.5	68
2	15	21.5	41
3	25	21.5	9
4	18	21.5	11
5	20	21.5	2
6	18	21.5	11
7	16	21.5	26
8	11	21.5	116
9	39	21.5	318
10	20	21.5	3
11	27	21.5	28
12	29	21.5	51
13	27	21.5	28
14	23	21.5	3
15	46	21.5	623
16	14	21.5	54
17	18	21.5	14
18	11	21.5	118
19	21	21.5	0
20	18	21.5	15
21	19	21.5	4
22	25	21.5	10
		Σ	1553

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{1553}{(22 - 1)}}$$

$$\sigma = 8.60$$

Coefficiente de variación

$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{D}} * 100$$

Donde:

\bar{D} = Deflexión media (0.01mm)

σ = Desviación estándar

Cv = Coeficiente de variación

$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{D}} * 100$$

$$Cv = \frac{8.60}{21.5} * 100$$

$$Cv = 40.1$$

Resumen

Deflexión promedio	\bar{D}	21.5
Desviación estándar	σ	8.6

Todos estos datos y resultados estadísticos desarrollados anteriormente sirven para determinar la deflexión característica.

Deflexión característica

Para diseño se emplea la deflexión característica, valor que representa mejor a una determinada sección, siguiendo el criterio adoptado normalmente en análisis estadísticos, se establece como deflexión característica el valor:

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

Donde:

D_c = Deflexión característica

\bar{D} = Deflexión promedio de los valores de D_0

σ = Desviación estándar

t = Coeficiente porcentual del área con probabilidad de superar D_c

Considerando que cada deflexión media representa una cierta extensión o área de pavimento, cada valor de “t” corresponderá a un porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la característica D_c correspondiente.

En la tabla siguiente se indican los valores más frecuentes:

Tabla 35. Ecuaciones de deflexión característica

Valor diseño %	Deflexión característica D_c	Extensión de pavimento con $\bar{D} > D_c$
50	\bar{D}	50
75	$\bar{D} + 0.674 * \sigma$	25
85	$\bar{D} + \sigma$	15
90	$\bar{D} + 1.3 * \sigma$	10
95	$\bar{D} + 1.645 * \sigma$	5
98	$\bar{D} + 2 * \sigma$	2
99	$\bar{D} + 2.33 * \sigma$	1
99.9	$\bar{D} + 3 * \sigma$	0.1

En el presente análisis se ha adoptado como deflexión característica aquella que corresponde al 95%, es decir la que es superada solo por el 5% de las determinaciones.

Datos

Deflexión promedio	\bar{D}	21.5
Desviación estándar	σ	8.6
coeficiente porcentual	t	1.645

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

$$D_c = 21.5 + 1.645 \cdot 8.6$$

$$D_c = 35.61 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

Carril derecho (ida)

Datos

Deflexión promedio	\bar{D}	20.8
Desviación estándar	σ	5.4
coeficiente porcentual	t	1.645

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

$$D_c = 20.8 + 1.645 \cdot 5.4$$

$$D_c = 29.74 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

Carril izquierdo (vuelta)

Resultados del tramo de aplicación

Carril	Deflexión característica
Derecho (ida)	$D_c = 35.61 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$
Izquierdo (vuelta)	$D_c = 29.74 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$

Deflexión admisible

- De acuerdo con el criterio de CONREVIAl que utiliza la siguiente expresión

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

- De acuerdo con el criterio del Instituto de Asfalto

$$D_{adm} = 25.64 N^{-0.2383}$$

Donde:

D_a = Deflexión característica admisible en mm.

N_{18} = Número de ejes estándar equivalentes de 8.2 ton acumulados en millones

Datos

$$N_{18} = 2.00 \times 10^6$$

(Ver anexo N° 5)

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

$$D_{adm} = \left(\frac{1.15}{2.00} \right)^{1/4}$$

$$D_{adm} = \mathbf{0.87 \text{ mm}}$$

De acuerdo con el criterio del Instituto de Asfalto

$$D_{adm} = 25.64 * N^{-0.2383}$$

$$D_{adm} = 25.64 (2.00 \times 10^6)^{-0.2383}$$

$$D_{adm} = \mathbf{0.81 \text{ mm}}$$

3.2.4 Método de Hogg para determinar el valor del CBR a partir de las deflexiones

Valores de deflexiones corregidas			
N°	Progresiva	Do	Dr
1	00+000	13	4

CASOS		I	II
Valores Dr/Do		> 0.70	> 0.426
R ₅₀	1/α	2.460	2.629
	1/β	0.592	0.548
	B	0	0
Valores Dr/Do		< 0.70	< 0.426
R ₅₀	1/α	371.1	2283.4
	1/β	0.219	0.2004
	B	2	3

Desarrollo

$$\frac{D_R}{D_0} = \frac{4}{13} = 0.29$$

$$R_{50} = R * \frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} - B}{\left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{D_0}{D_R} - 1\right)\right]^{\frac{1}{\beta}} - B}$$

$$R_{50} = 50 * \frac{(2283.4)^{0.2004} - 3}{\left[2283.4 \left(\frac{13}{4} - 1\right)\right]^{0.2004} - 3} = 32.152$$

- Módulo de elasticidad de la sub rasante

$$E_0 = 1091314.96 * (D_0 * R_{50})^{-0.939}$$

$$E_0 = 1091314.96 * (13 * 32.152)^{-0.939}$$

$$E_0 = 3717.29$$

- CBR

$$E_o = K * CBR$$

$$CBR = \frac{E_o}{K}$$

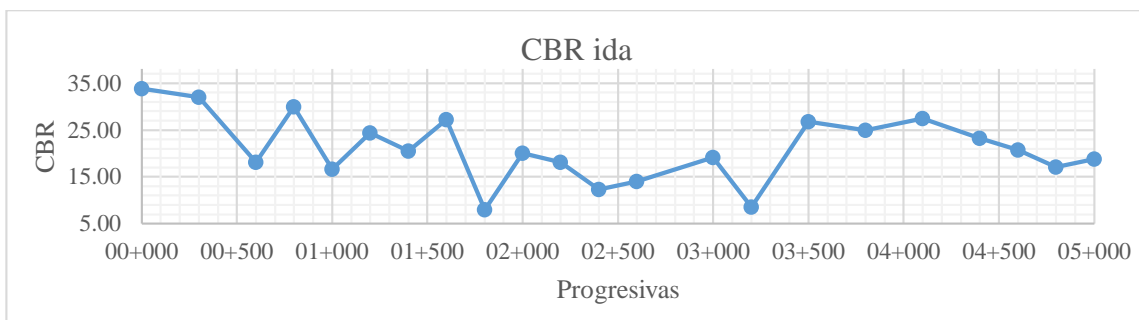
$$CBR = 33.79 \%$$

Tabla 36. CBR obtenido aplicando método de Hogg - tramo derecho

N°	Progresiva	Do	Dr	Dr/Do	1/α	1/β	B	R 50	Eo	CBR (%)
1	00+000	13	4	0.29	2283.4	0.2004	3	32.152	3717.29	33.79
2	00+300	15	4	0.25	2283.4	0.2004	3	29.793	3522.48	32.02
3	00+600	25	8	0.31	2283.4	0.2004	3	33.648	1991.75	18.11
4	00+800	18	4	0.20	2283.4	0.2004	3	26.569	3293.59	29.94
5	01+000	20	9	0.45	2.629	0.548	0	45.246	1826.81	16.61
6	01+200	18	5	0.30	2283.4	0.2004	3	33.120	2677.85	24.34
7	01+400	16	7	0.44	2.629	0.548	0	44.245	2252.43	20.48
8	01+600	11	5	0.50	2.629	0.548	0	50.000	2988.70	27.17
9	01+800	39	20	0.50	2.629	0.548	0	50.000	882.33	8.02
10	02+000	20	7	0.36	2283.4	0.2004	3	37.684	2206.08	20.06
11	02+200	27	7	0.27	2283.4	0.2004	3	30.885	1987.36	18.07
12	02+400	29	13	0.44	2.629	0.548	0	43.567	1354.13	12.31
13	02+600	27	11	0.40	2283.4	0.2004	3	40.548	1539.11	13.99
14	03+000	23	7	0.31	2283.4	0.2004	3	33.648	2106.23	19.15
15	03+200	46	18	0.38	2283.4	0.2004	3	39.308	945.41	8.59
16	03+500	14	5	0.38	2283.4	0.2004	3	38.555	2948.46	26.80
17	03+800	18	5	0.30	2283.4	0.2004	3	33.120	2746.37	24.97
18	04+100	11	5	0.50	2.629	0.548	0	50.000	3013.75	27.40
19	04+400	21	5	0.25	2283.4	0.2004	3	29.793	2556.10	23.24
20	04+600	18	7	0.40	2283.4	0.2004	3	40.548	2280.57	20.73
21	04+800	19	9	0.45	2.629	0.548	0	45.246	1881.34	17.10
22	05+000	25	7	0.29	2283.4	0.2004	3	32.152	2067.46	18.80

Fuente: Elaboración propia

Figura 23. CBR - tramo derecho



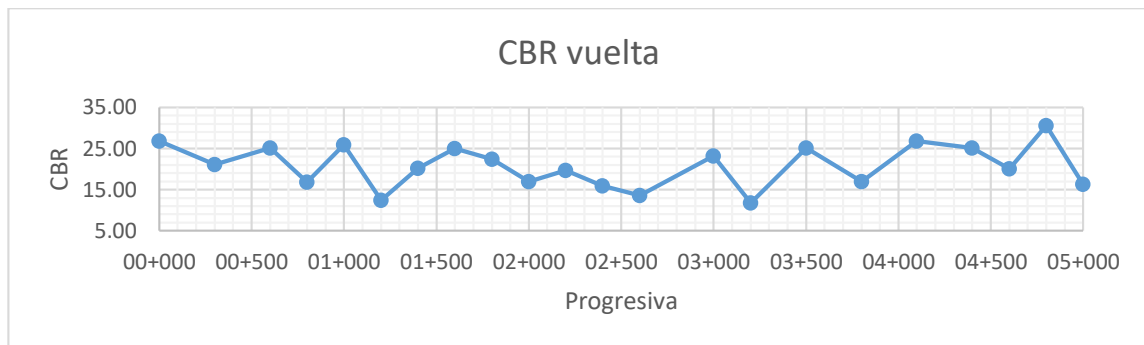
Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. CBR obtenido aplicando modelo de Hogg - tramo izquierdo

N°	Progresiva	Do	Dr	Dr/Do	1/α	1/β	B	R50	Eo	CBR (%)
1	05+000	25	9	0.357	2283.4	0.2004	3	37.195	1788.21	16.26
2	04+800	18	4	0.200	2283.4	0.2004	3	26.569	3363.83	30.58
3	04+600	20	7	0.364	2283.4	0.2004	3	37.684	2215.33	20.14
4	04+400	18	5	0.300	2283.4	0.2004	3	33.120	2757.78	25.07
5	04+100	14	5	0.375	2283.4	0.2004	3	38.555	2948.46	26.80
6	03+800	21	9	0.417	2283.4	0.2004	3	41.943	1861.65	16.92
7	03+500	18	5	0.300	2283.4	0.2004	3	33.120	2757.78	25.07
8	03+200	35	12	0.350	2283.4	0.2004	3	36.664	1302.08	11.84
9	03+000	21	5	0.250	2283.4	0.2004	3	29.793	2556.10	23.24
10	02+600	30	11	0.353	2283.4	0.2004	3	36.882	1502.06	13.66
11	02+400	27	9	0.333	2283.4	0.2004	3	35.451	1753.32	15.94
12	02+200	21	7	0.333	2283.4	0.2004	3	35.451	2171.04	19.74
13	02+000	18	9	0.500	2.629	0.548	0	50.000	1865.48	16.96
14	01+800	23	5	0.231	2283.4	0.2004	3	28.547	2468.06	22.44
15	01+600	18	5	0.300	2283.4	0.2004	3	33.120	2746.37	24.97
16	01+400	19	7	0.364	2283.4	0.2004	3	37.684	2224.58	20.22
17	01+200	28	12	0.438	2.629	0.548	0	43.567	1365.48	12.41
18	01+000	16	5	0.333	2283.4	0.2004	3	35.451	2844.36	25.86
19	00+800	21	9	0.417	2283.4	0.2004	3	41.943	1853.95	16.85
20	00+600	18	5	0.300	2283.4	0.2004	3	33.120	2757.78	25.07
21	00+300	16	7	0.444	2.629	0.548	0	44.245	2319.66	21.09
22	00+000	14	5	0.375	2283.4	0.2004	3	38.555	2948.46	26.80

Fuente: Elaboración propia

Figura 24. CBR tramo izquierdo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 38. Comparación de valores de CBR obtenidos por el método de Hogg

Comparación de valores		
Progresiva	CBR ida	CBR vuelta
00+000	33.79	26.80
00+300	32.02	21.09
00+600	18.11	25.07
00+800	29.94	16.85
01+000	16.61	25.86
01+200	24.34	12.41
01+400	20.48	20.22
01+600	27.17	24.97
01+800	8.02	22.44
02+000	20.06	16.96
02+200	18.07	19.74
02+400	12.31	15.94
02+600	13.99	13.66
03+000	19.15	23.24
03+200	8.59	11.84
03+500	26.80	25.07
03+800	24.97	16.92
04+100	27.40	26.80
04+400	23.24	25.07
04+600	20.73	20.14
04+800	17.10	30.58
05+000	18.80	16.26

Fuente: Elaboración propia

3.2.4.2 Aplicación de estadística a valores de CBR obtenidos a partir de deflexiones

Nº	CBR (%)	$\delta = (x_i - \bar{x})$	δ^2
1	33.79	12.89	166.24
2	32.02	11.12	123.70
3	18.11	-2.79	7.80
4	29.94	9.04	81.75
5	16.61	-4.29	18.43
6	24.34	3.44	11.86
7	20.48	-0.42	0.18
8	27.17	6.27	39.31
9	8.02	-12.88	165.87
10	20.06	-0.84	0.71
11	18.07	-2.83	8.03
12	12.31	-8.59	73.79
13	13.99	-6.91	47.73
14	19.15	-1.75	3.07
15	8.59	-12.31	151.43
16	26.80	5.90	34.86
17	24.97	4.07	16.54
18	27.40	6.50	42.22
19	23.24	2.34	5.46
20	20.73	-0.17	0.03
21	17.10	-3.80	14.42
22	18.80	-2.11	4.43
23	26.80	5.90	34.86
24	21.09	0.19	0.04
25	25.07	4.17	17.39
26	16.85	-4.05	16.37
27	25.86	4.96	24.58
28	12.41	-8.49	72.03
29	20.22	-0.68	0.46
30	24.97	4.07	16.54
31	22.44	1.54	2.36
32	16.96	-3.94	15.53
33	19.74	-1.16	1.35
34	15.94	-4.96	24.61
35	13.66	-7.25	52.49
36	23.24	2.34	5.46
37	11.84	-9.06	82.14
38	25.07	4.17	17.39
39	16.92	-3.98	15.81
40	26.80	5.90	34.86
41	25.07	4.17	17.39
42	20.14	-0.76	0.58
43	30.58	9.68	93.70
44	16.26	-4.64	21.57
	$\bar{x} = 20.90$		1585.36

Desarrollo

Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \mathbf{20.90}$$

Error o desviación

$$E_{CBR} = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n*(n-1)}}$$

$$E_{CBR} = \sqrt{\frac{1585.36}{44*(44-1)}}$$

$$E_{CBR} = \mathbf{0.92}$$

Valor de CBR verdadero superior e inferior

$$CBR_V = \bar{x} \mp E_{CBR}$$

$$CBR_V = \mathbf{20.90 \mp 0.92}$$

$$CBR_{sup} = 20.90 + 0.92$$

$$CBR_{sup} = \mathbf{21.82}$$

$$CBR_{inf} = 20.90 - 0.92$$

$$CBR_{inf} = \mathbf{19.98}$$

Error relativo y Error porcentual

$$Er = \frac{E_{CBR}}{\bar{x}}$$

$$Er = \frac{0.92}{20.90}$$

$$Er = \mathbf{0.044}$$

$$Ep = Er*100$$

$$Ep = 0.044*100$$

$$Ep = \mathbf{4.40 \%}$$

3.2.5 Ensayo CBR In situ para validar las deflexiones

Tramo: El Cruce – Valle de la Concepción

Ecuación del anillo: $y = 9.2414 * x + 57.058$

Factor de Conversión: 2.21

Punto N°1

Progresiva 01 + 000

Sub rasante

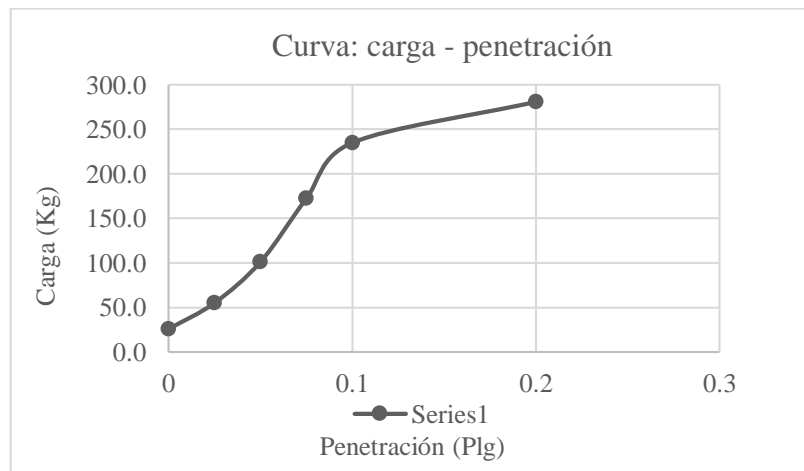
Carga de ensayo = $(9.2414 * \text{lectura del dial} + 57.058) / 2.21$

Tabla 39. CBR In situ - punto N°1

C.B.R. "In situ"					
Penetración		Carga normal	Resultados		
			Carga ensayo	Esfuerzo	C.B.R. Corregido
Pulg	mm	Kg	Kg	Kg/cm ²	%
0	0		25.8	0	
0.025	0.63		55.1	2.8	
0.05	1.27		101.1	5.2	
0.075	1.9		172.2	8.9	
0.1	2.54	1360	234.9	12.1	17.27
0.2	5.08	2040	280.9	14.5	13.77

Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Carga - penetración N°1



Fuente: Elaboración propia

CBR In situ
17.27

Punto N°2

Progresiva 02 + 000

Sub rasante

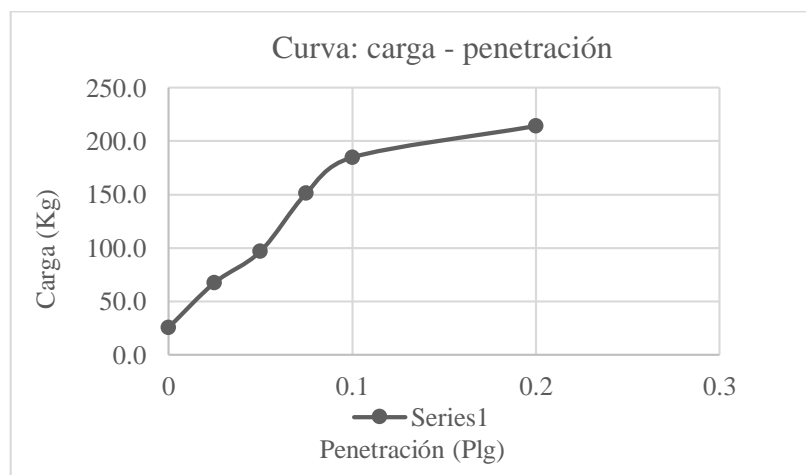
Carga de ensayo = (9.2414*lectura del dial + 57.058) /2.21

Tabla 40. CBR In situ - punto N°2

C.B.R. "In situ"					
Penetración		Carga normal	Resultados		
			Carga ensayo	Esfuerzo	C.B.R. Corregido
Pulg	mm	Kg	Kg	Kg/cm ²	%
0	0		25.8	0	
0.025	0.63		67.6	3.5	
0.05	1.27		96.9	5.0	
0.075	1.9		151.3	7.8	
0.1	2.54	1360	184.7	9.5	13.58
0.2	5.08	2040	214.0	11.1	10.49

Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Carga - penetración N°2



Fuente: Elaboración propia

CBR In situ
13.58

Punto N°3

Progresiva 03 + 000

Sub rasante

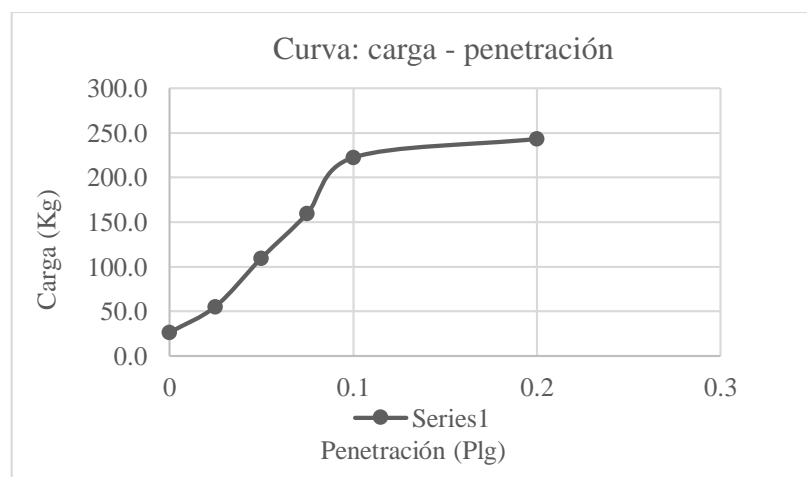
$$\text{Carga de ensayo} = (9.2414 * \text{lectura del dial} + 57.058) / 2.21$$

Tabla 41. CBR In situ - punto N°3

C.B.R. "In situ"					
Penetración		Carga normal	Resultados		
			Carga ensayo	Esfuerzo	C.B.R. Corregido
Pulg	mm	Kg	Kg	Kg/cm ²	%
0	0		25.8	0	
0.025	0.63		55.1	2.8	
0.05	1.27		109.5	5.7	
0.075	1.90		159.6	8.2	
0.1	2.54	1360	222.4	11.5	16.35
0.2	5.08	2040	243.3	12.6	11.92

Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Carga - penetración N° 3



Fuente: Elaboración propia

CBR In situ
16.35

Punto N°4

Progresiva 04 + 000

Sub rasante

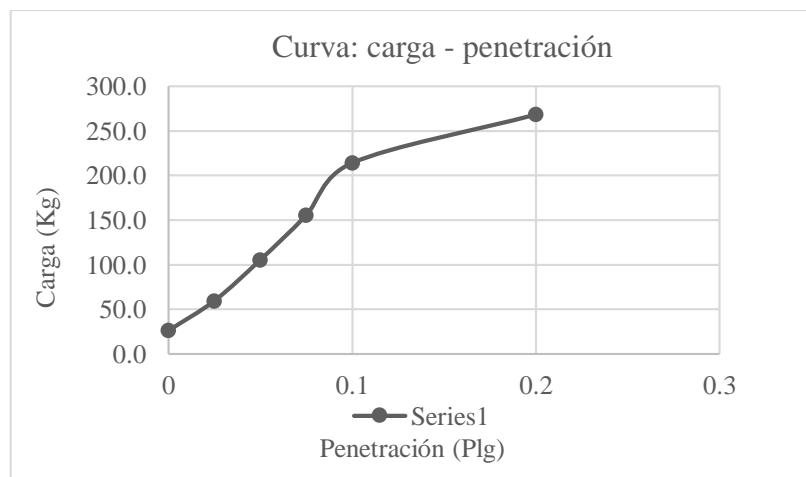
$$\text{Carga de ensayo} = (9.2414 * \text{lectura del dial} + 57.058) / 2.21$$

Tabla 42. CBR In situ - punto N°4

C.B.R. "In situ"					
Penetración		Carga normal	Resultados		
			Carga ensayo	Esfuerzo	C.B.R. Corregido
Pulg	mm	Kg	Kg	Kg/cm ²	%
0	0		25.8	0	
0.025	0.63		59.3	3.1	
0.05	1.27		105.3	5.4	
0.075	1.9		155.4	8.0	
0.1	2.54	1360	214.0	11.1	15.73
0.2	5.08	2040	268.4	13.9	13.15

Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Carga - penetración N°4



Fuente: Elaboración propia

CBR In situ
15.73

Punto N°5

Progresiva 05 + 000

Sub rasante

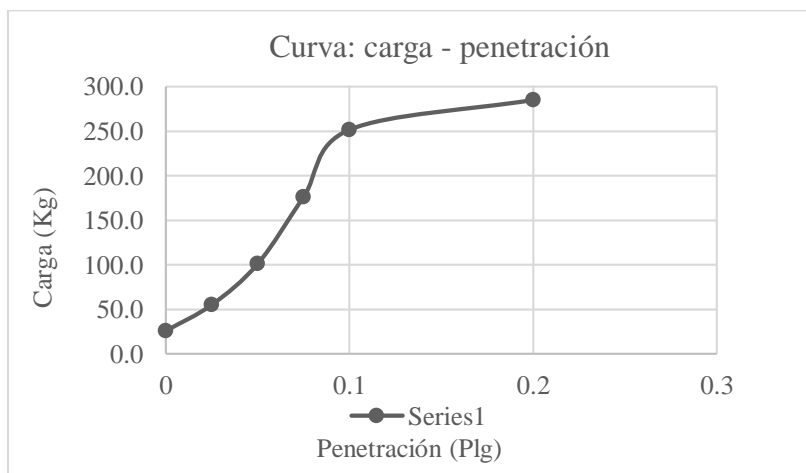
$$\text{Carga de ensayo} = (9.2414 * \text{lectura del dial} + 57.058) / 2.21$$

Tabla 43. CBR In situ – punto N°5

C.B.R. "In situ"					
Penetración		Carga normal	Resultados		
			Carga ensayo	Esfuerzo	C.B.R. Corregido
Pulg	mm	Kg	Kg	Kg/cm ²	%
0	0		25.8	0	
0.025	0.63		55.1	2.8	
0.05	1.27		101.1	5.2	
0.075	1.9		176.4	9.1	
0.1	2.54	1360	251.6	13.0	18.50
0.2	5.08	2040	285.1	14.7	13.97

Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Carga - penetración N°5



Fuente: Elaboración propia

CBR In situ
18.50

Tabla 44. Resumen de valores del ensayo CBR In situ

Valores obtenidos del ensayo “CBR In situ”		
Progresiva 01 + 000		
Capas del pavimento	Valor	Clasificación
Sub rasante	17.27 %	Regular – Buena
Progresiva 02 + 000		
Capas del pavimento	Valor	Clasificación
Sub rasante	13.58 %	Regular – Buena
Progresiva 03 + 000		
Capas del pavimento	Valor	Clasificación
Sub rasante	16.35 %	Regular – Buena
Progresiva 04 + 000		
Capas del pavimento	Valor	Clasificación
Sub rasante	15.73 %	Regular – Buena
Progresiva 05 + 000		
Capas del pavimento	Valor	Clasificación
Sub rasante	18.50 %	Regular – Buena
CBR In situ promedio	16.29 %	Regular – Buena

Fuente: Elaboración propia

3.3 Resultados

3.3.2 Ensayos acelerados

Tabla 45. Resultados de ensayos acelerados - horno 180°

Nro. de muestra	Temperatura	Tiempo	Lectura Deformación (0.01 in)	Lectura Deformación (in)	Deformación (mm)
	(°C)	(hr)			
1	180°	3.5	20	0.2	5.080
2	180°	3.5	14	0.14	3.556
3	180°	3.5	18	0.18	4.572
4	180°	3.5	18	0.18	4.572
5	180°	3.5	20	0.2	5.080
6	180°	3.5	22	0.22	5.588
7	180°	3.5	18	0.18	4.572
8	180°	3.5	20	0.2	5.080
9	180°	3.5	20	0.2	5.080
10	180°	3.5	18	0.18	4.572

Fuente: Elaboración propia

N	10
Media	4.78
Mediana	4.83
Moda	5.08
Desviación estándar	0.55
Varianza de la muestra	0.30
Amplitud	2.03
Valor mínimo	3.56
Valor máximo	5.59

Tabla 46. Resultados de ensayos acelerados - briqueta hervida

Nro. de muestra	Temperatura	Tiempo	Deformación (0.01 in)	Lectura Deformación (in)	Deformación (mm)
	(°C)	(hr)			
1	-	3.5	24	0.24	6.096
2	-	3.5	23	0.23	5.842
3	-	3.5	20	0.2	5.08
4	-	3.5	25	0.25	6.35
5	-	3.5	25	0.25	6.35
6	-	3.5	22	0.22	5.588
7	-	3.5	20	0.2	5.08
8	-	3.5	22	0.22	5.588
9	-	3.5	25	0.25	6.35
10	-	3.5	20	0.2	5.08

Fuente: Elaboración propia

N	10
Media	5.74
Mediana	5.72
Moda	5.08
Desviación estándar	0.54
Varianza de la muestra	0.29
Amplitud	1.27
Valor Mínimo	5.08
Valor Máximo	6.35

3.3.1 Deflexiones y radios de curvatura

Tabla 47. Resultados de deflexiones y radios de curvatura corregida en c. derecho

N°	Progresiva m	Lecturas del dial						Parámetros de evaluación			Parámetros de evaluación corregidos por temp. a 20 °C			Temperaturas		Espesor
		L- a 0cm	L- a 25cm	L- a 50cm	L- a 100cm	L- a 150cm	L-a 200cm	Do	D25	Rc	Do	D25	Rc	Amb	Asfalto	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	Rc	°C	°C	cm
1	00+000	14	6	4	4	0	0	14	6	391	13	6	414	29.0	32.0	5.0
2	00+300	16	10	4	2	0	0	16	10	521	15	9	552	29.0	32.0	5.0
3	00+600	26	14	8	2	0	0	26	14	260	25	13	276	29.0	32.0	5.0
4	00+800	20	12	4	2	0	0	20	12	391	18	11	430	29.0	40.0	5.0
5	01+000	22	16	10	2	0	0	22	16	521	20	15	573	29.0	40.0	5.0
6	01+200	20	12	6	2	0	0	20	12	391	18	11	430	29.0	40.0	5.0
7	01+400	18	12	8	4	2	0	18	12	521	16	11	573	30.0	40.0	5.0
8	01+600	12	8	6	2	0	0	12	8	781	11	7	875	30.0	44.0	5.0
9	01+800	44	32	22	4	2	0	44	32	260	39	29	292	30.0	44.0	5.0
10	02+000	22	14	8	2	2	0	22	14	391	20	13	438	30.0	44.0	5.0
11	02+200	30	20	8	8	2	0	30	20	313	27	18	350	30.0	44.0	5.0
12	02+400	32	20	14	8	0	0	32	20	260	29	18	292	30.0	44.0	5.0
13	02+600	30	18	12	4	2	0	30	18	260	27	16	292	30.0	44.0	5.0
14	03+000	26	16	8	4	2	0	26	16	313	23	14	352	30.0	45.0	5.0
15	03+200	52	40	20	4	0	0	52	40	260	46	36	292	30.0	44.0	5.0
16	03+500	16	8	6	2	0	0	16	8	391	14	7	443	30.0	47.0	5.0
17	03+800	20	10	6	2	0	0	20	10	313	18	9	353	30.0	46.0	5.0
18	04+100	12	8	6	2	0	0	12	8	781	11	7	883	31.0	46.0	5.0
19	04+400	24	12	6	4	2	0	24	12	260	21	11	294	31.0	46.0	5.0
20	04+600	20	12	8	2	0	0	20	12	391	18	11	443	31.0	47.0	5.0
21	04+800	22	12	10	4	2	0	22	12	313	19	11	355	31.0	47.0	5.0
22	05+000	28	14	8	2	0	0	28	14	223	25	12	253	31.0	47.0	5.0

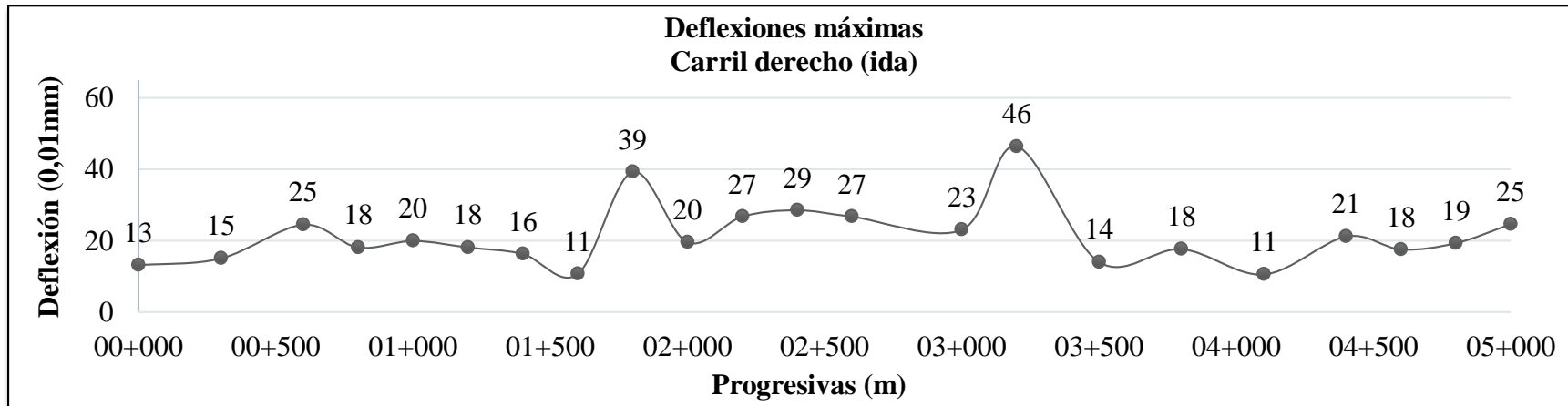
Fuente: Elaboración propia

Tabla 48. Resumen de resultados para deflexiones carril derecho

Número de muestras	22	22	22
Sumatoria	472	293	9453
Promedio	21.5	13.3	429.7
Deflexión mínima	11.0	6.0	253
Deflexión máxima	46.0	36.0	883
Desviación estándar	8.60	7.00	173.3
Varianza	73.9	49.4	30166
Coefficiente de varianza	40.1	52.8	40.4
Valor característico	35.61	24.9	715.4

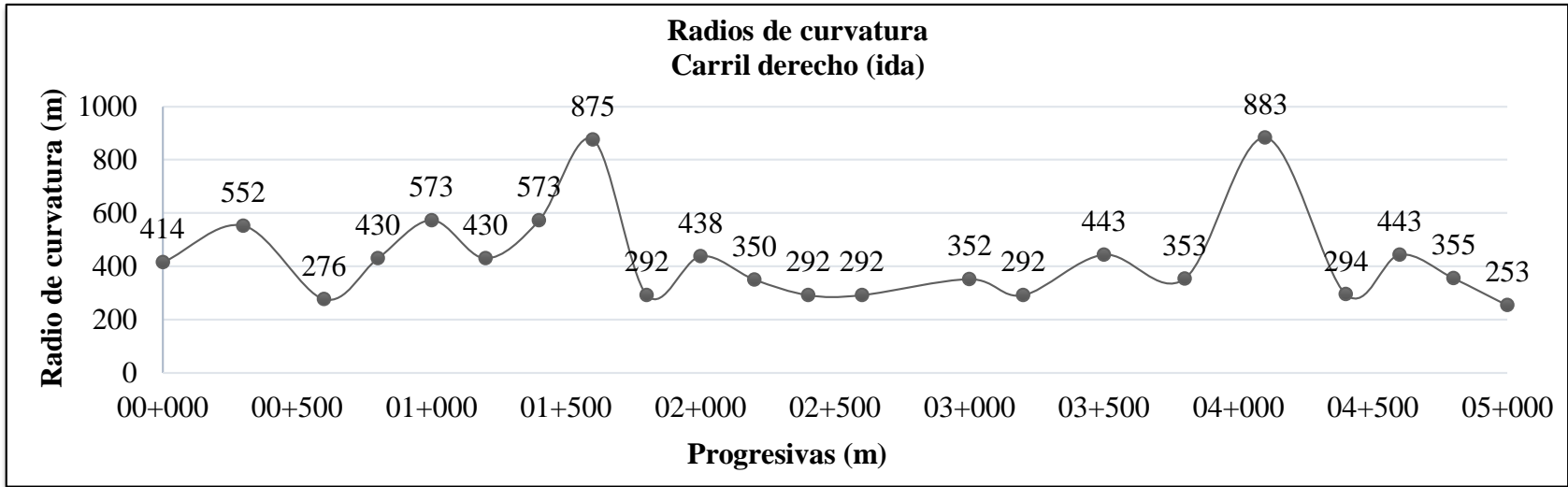
Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Deflexiones máximas corregidas - carril derecho



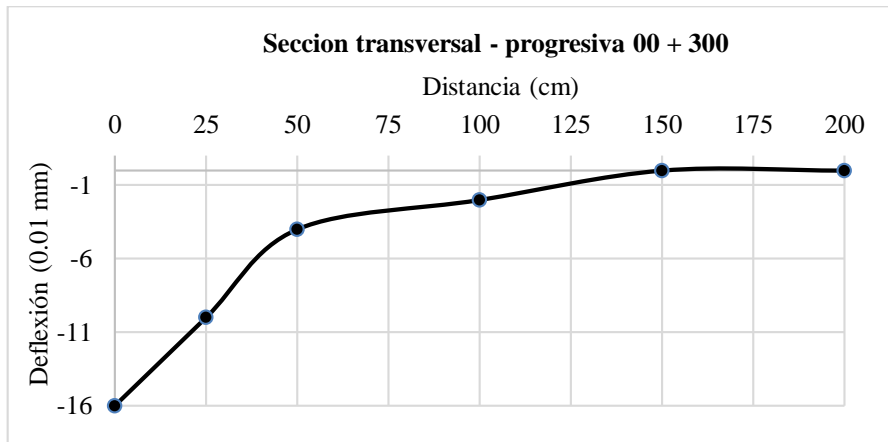
Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Radios de curvatura - carril derecho



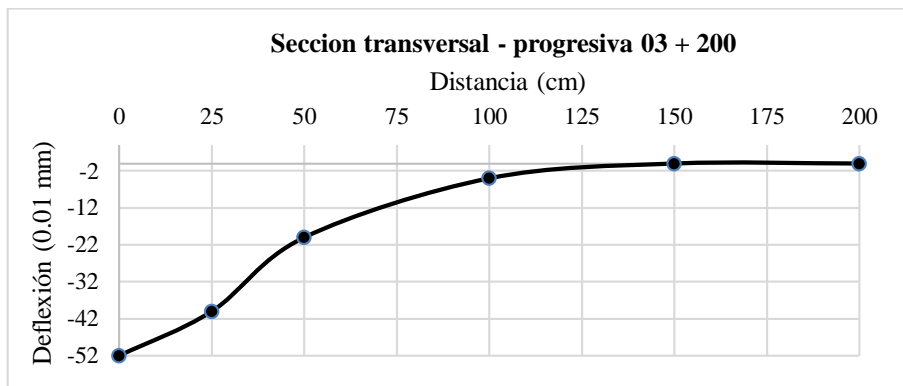
Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Lectura de deflexiones en la progresiva 00 + 300



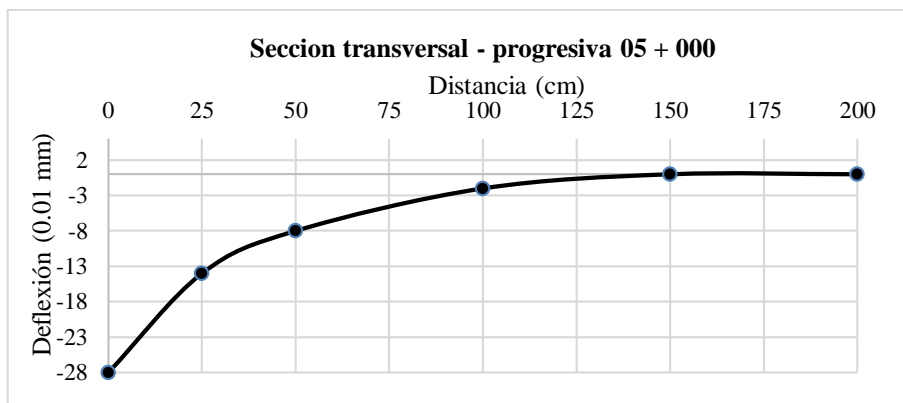
Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Lectura de deflexiones en la progresiva 03 + 200



Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Lectura de deflexiones en la progresiva 05 + 000



Fuente: Elaboración propia

Tabla 49. Resultados de deflexiones y radios de curvatura corregida c. izquierdo

N°	Progresiva m	Lecturas del dial						Parámetros de evaluación			Parámetros de evaluación corregidos por temp. a 20 °C			Temperatura		Espesor
		L- a 0cm	L- a 25cm	L- a 50cm	L- a 100cm	L- a 150cm	L-a 200cm	Do	D25	Rc	Do	D25	Rc	Amb	Asfalto	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	Rc	°C	°C	cm
1	05+000	28	16	10	4	0	0	28	16	260	25	14	293	31.0	45.0	5.0
2	04+800	20	10	4	2	0	0	20	10	313	18	9	352	31.0	45.0	5.0
3	04+600	22	12	8	2	0	0	22	12	313	20	11	352	31.0	45.0	5.0
4	04+400	20	12	6	2	0	0	20	12	391	18	11	443	31.0	47.0	5.0
5	04+100	16	10	6	0	0	0	16	10	521	14	9	591	31.0	47.0	5.0
6	03+800	24	16	10	4	2	0	24	16	391	21	14	443	31.0	47.0	5.0
7	03+500	20	10	6	2	2	0	20	10	313	18	9	355	31.0	47.0	5.0
8	03+200	40	28	14	6	2	0	40	28	260	35	25	294	31.0	46.0	5.0
9	03+000	24	10	6	2	0	0	24	10	223	21	9	252	31.0	46.0	5.0
10	02+600	34	18	12	6	2	0	34	18	195	30	16	220	31.0	45.0	5.0
11	02+400	30	16	10	6	0	0	30	16	223	27	14	251	31.0	45.0	5.0
12	02+200	24	12	8	4	0	0	24	12	260	21	11	294	31.0	46.0	5.0
13	02+000	20	10	10	4	2	0	20	10	313	18	9	353	31.0	46.0	5.0
14	01+800	26	10	6	6	0	0	26	10	195	23	9	221	31.0	46.0	5.0
15	01+600	20	14	6	4	2	0	20	14	521	18	12	589	32.0	46.0	5.0
16	01+400	22	12	8	2	0	0	22	12	313	19	11	353	32.0	46.0	5.0
17	01+200	32	18	14	8	2	0	32	18	223	28	16	252	32.0	46.0	5.0
18	01+000	18	10	6	2	0	0	18	10	391	16	9	441	32.0	46.0	5.0
19	00+800	24	12	10	8	2	0	24	12	260	21	11	294	32.0	46.0	5.0
20	00+600	20	10	6	2	0	0	20	10	313	18	9	355	32.0	47.0	5.0
21	00+300	18	10	8	4	2	0	18	10	391	16	9	443	32.0	47.0	5.0
22	00+000	16	6	6	4	0	0	16	6	313	14	5	355	32.0	47.0	5.0

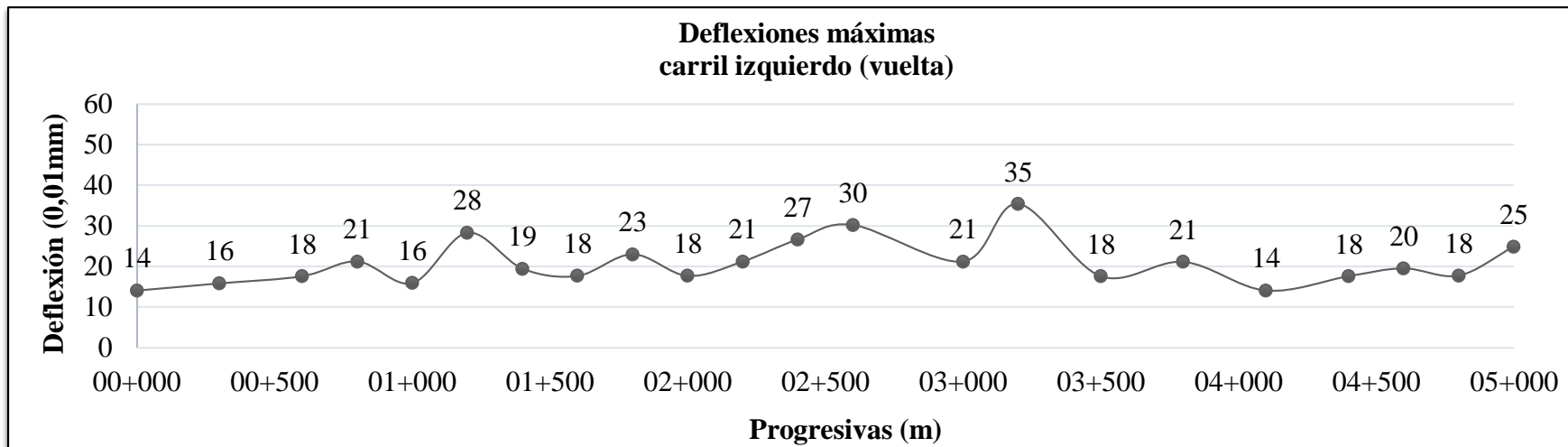
Fuente: Elaboración propia

Tabla 50. Resumen de resultados para deflexiones carril izquierdo

Número de muestras	22	22	22
Sumatoria	458	250	7796
Promedio	20.8	11.3	354.4
Deflexión mínima	14.0	5.0	220
Deflexión máxima	35.0	25.0	591
Desviación estándar	5.40	4.0	103.4
Varianza	29.3	16.4	10685
Coefficiente de varianza	26.0	35.7	29.2
Valor característico	29.74	18.0	536.7

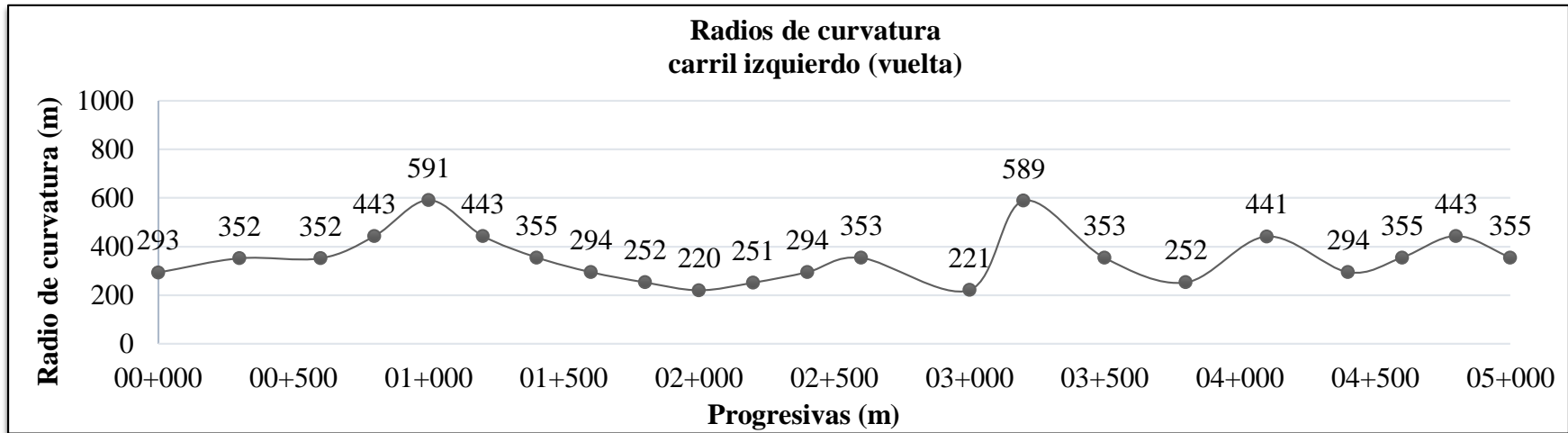
Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Deflexiones máximas corregidas carril izquierdo



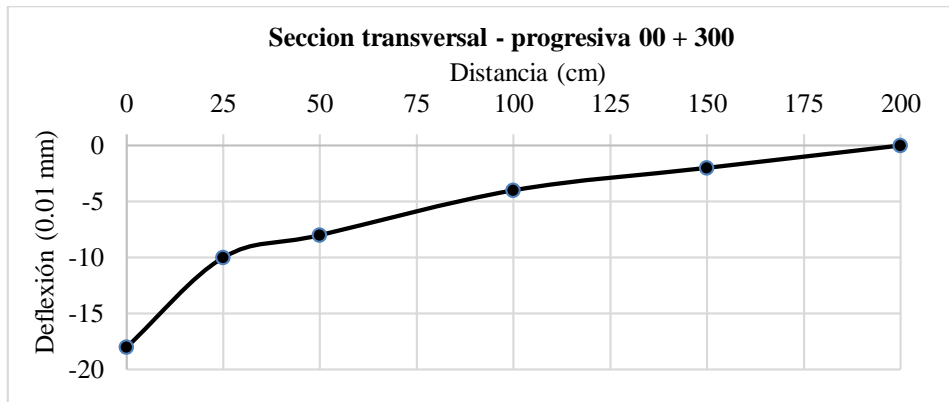
Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Radios de curvatura - carril izquierdo



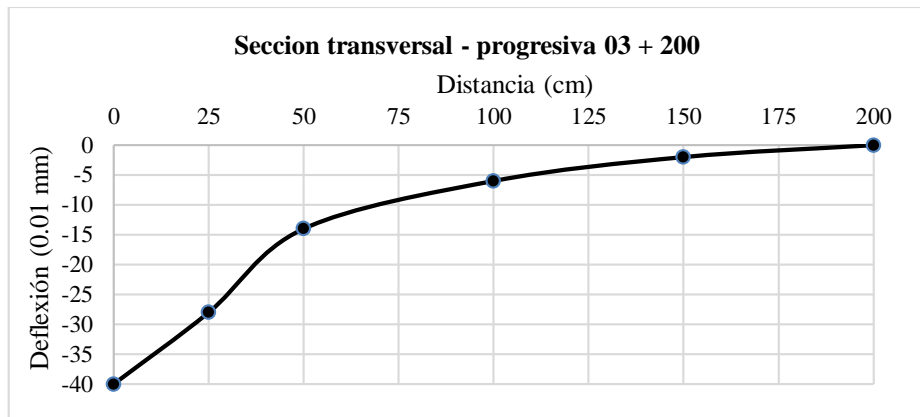
Fuente: Elaboración propia

Figura 37. Lectura de deflexión en la progresiva 00 + 300



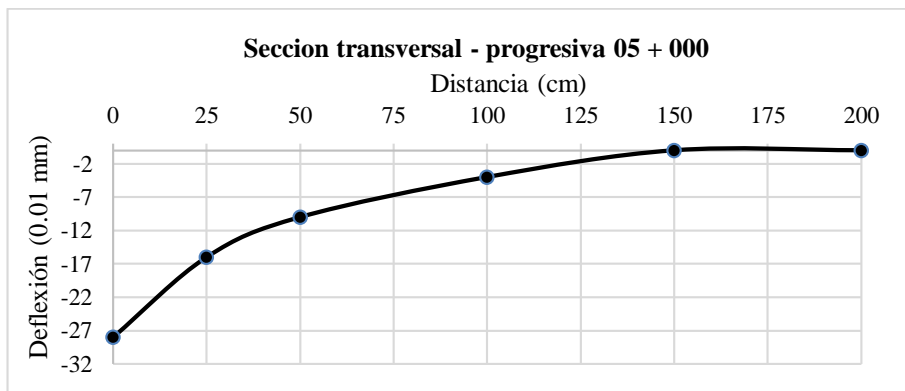
Fuente: Elaboración propia

Figura 38. Lectura de deflexión en la progresiva 03 + 200



Fuente: Elaboración propia

Figura 39. Lectura de deflexiones en la progresiva 05 + 000



Fuente: Elaboración propia

3.4 Análisis de resultados

3.4.1 Análisis deformación acelerada

En concepto general nos dice que la capacidad de recuperación elástica de los diferentes materiales viales compactados es imperfecta bajo esfuerzos del mismo orden de los que soportan en servicio. Ello determina que las deformaciones recuperables por elasticidad instantánea y retardada (función del tiempo) pueda ir acompañada de deformaciones permanentes de pequeña magnitud de acuerdo a la naturaleza del material, tiempo de aplicación de las cargas y en este caso de mezclas asfálticas, de la temperatura de las mismas.

Las deformaciones permanentes provocadas por los esfuerzos de compresión y corte que actúan sobre las distintas capas de la estructura bajo cargas, se acumula en función del número de aplicaciones y provocan modificaciones de los perfiles longitudinales y transversales, particularmente en la zona de canalización del tránsito.

Las deformaciones acumuladas son decrecientes, si no se ha alcanzado el colapso del material y este llega paulatinamente a un comportamiento “cuasi – elástico”. En el caso contrario, de las deformaciones son crecientes con fluencia plástica o rotura de la estructura.

Las deformaciones permanentes de las capas subyacentes a la de rodamiento son acompañadas por el revestimiento asfáltico en virtud de su flexibilidad, entendiéndose como tal la capacidad de adaptarse sin fisuramiento en la zona de mayor curvatura de la deformación permanente.

3.4.1.1 Horno a 180 °C

La deformación acelerada medida después de haber sido sometido los especímenes a una temperatura constante de horno de laboratorio por un periodo de 3.5 hr, esta acción afecta directamente a su estructura, perdiendo así de manera más acelerada las propiedades de resistencia y durabilidad que lo caracteriza.

El valor de la temperatura (180°C) viene siendo una condición de exposición extrema, este valor se toma como referente a la afección que causa en un periodo corto de tiempo.

Los resultados que se presentan da primeramente un valor promedio de 4.78 mm, siendo este el valor máximo de deformación que alcanza la pieza antes de la rotura a razón de una determinada carga máxima, siendo este el valor límite que presenta las deformaciones recuperables, pasando este valor ya se encuentra en el campo de las deformaciones permanentes y que mediante esta rotura pierde la funcionalidad y serviciabilidad a la que fue proyectada en su diseño.

Pero este valor no viene siendo un número de referencia único al estudio en su conjunto porque en el total de muestras se presenta un estudio estadístico y da como parte de sus resultados un valor mínimo de deformación de 3.56 mm considerando que todas las muestras tienen las mismas condiciones de materiales como estructurales, haciendo notar que se puede tomar este valor por el cual la deformación formada por la carga máxima va alcanzar en su periodo de vida útil.

3.4.1.2 Hervida

La deformación acelerada medida después de haber sido sometido los especímenes a el agua hirviendo a temperatura constante por un periodo de 3,5 hr presenta un valor promedio de **5.74 mm**, de igual manera este valor se presenta como límite para las deformaciones recuperables. Pasando este límite las deformaciones siguientes serán permanentes.

Como valor mínimo al estudio se presenta con un número de deformación de 5.08 mm este siendo considerado en un rango determinado.

Comparando ambos valores resultantes de deflexiones medias se denota que los especímenes expuestos a un ambiente caliente con temperatura uniforme más elevada producen más daños en su estructura debilitando su resistencia, permitiendo menores valores de deformaciones para su periodo útil de diseño.

Siendo este valor de 4.78 mm el límite que incluye las deformaciones recuperables que puede llegar en pavimento. Este resultado se lo adecua a las condiciones del tramo de aplicación y se lo estima como valor máximo de deformación que va a alcanzar el pavimento en su periodo destinado a su servicio.

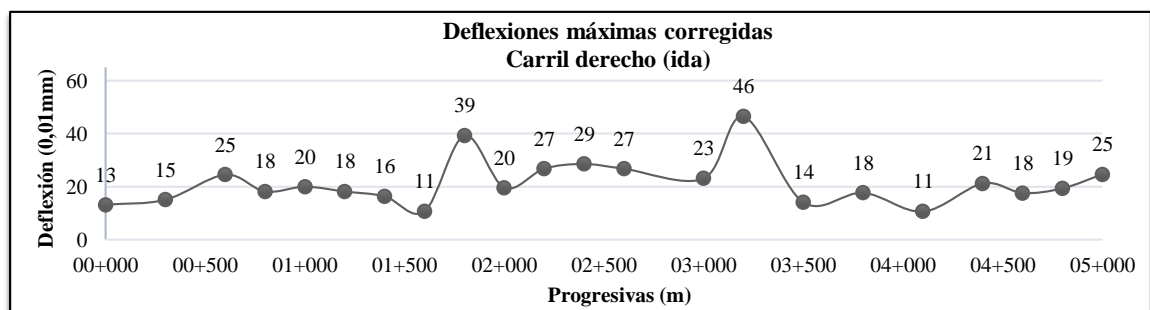
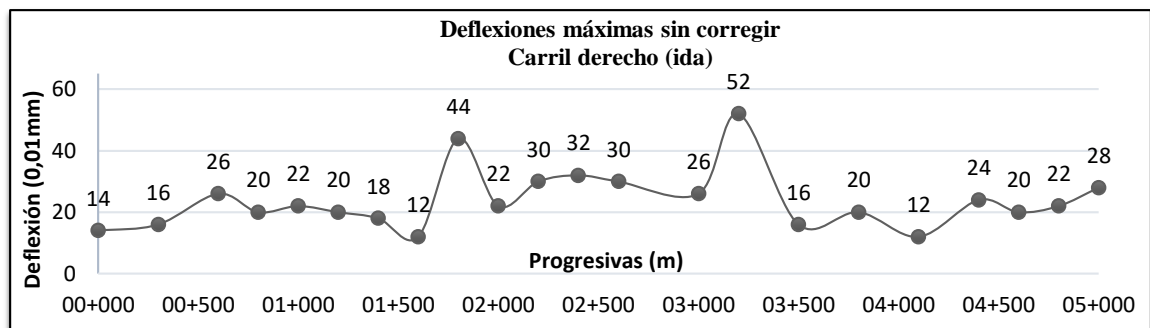
3.4.2 Análisis de deflexiones con viga Benkelman

3.4.2.1 Análisis de deflexiones

La deflexión de una estructura de pavimento asfáltico es el desplazamiento vertical de la superficie del pavimento en respuesta a la aplicación de una carga externa y da como resultado esfuerzos y deformaciones.

La forma y dimensión del cuenco de deflexiones, cubre importante información acerca de las características estructurales del pavimento y su sub rasante. Las deflexiones que son medidas hacia el extremo del cuenco reflejan la condición de la sub rasante, mientras que la medida en el centro de aplicación de carga refleja la condición de la capa superficial.

Valores de deflexiones medidas en el carril derecho



Para un análisis numérico son muchos los factores que afectan los valores medidos de deflexión en un pavimento. Ello hace que la interpretación de los resultados sea algo compleja, los tres factores principales son: la carga, el pavimento mismo y el clima.

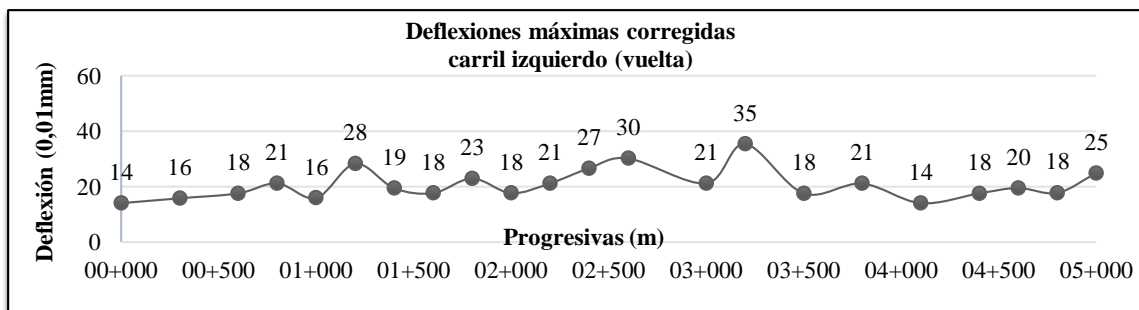
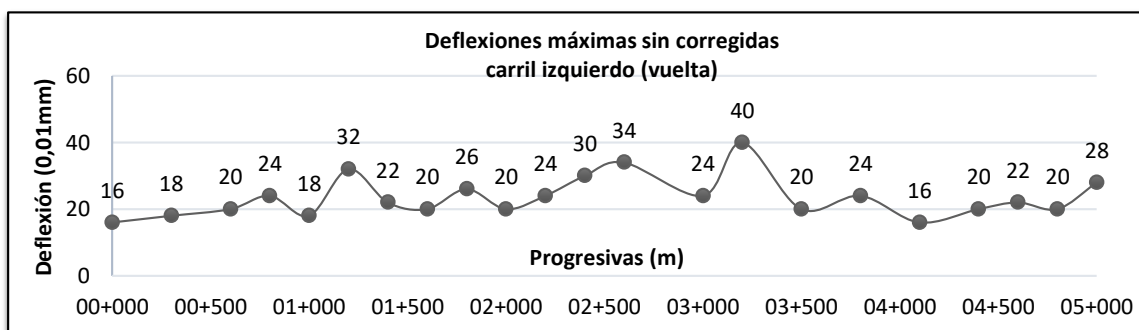
La condición y las características del pavimento pueden producir grandes variaciones en los valores de la deflexión, entre estos puede estar:

- Los cambios en la estructura del pavimento o en el tipo de suelo de sub rasante afectando a la magnitud de las deflexiones.
- Las variaciones aleatorias en la rigidez del pavimento producidas por factores tales como diferencias en la compactación de sus capas, en las características de los materiales y en la humedad, pueden producir grandes variaciones en las deflexiones en trayectos muy cortos.

Tal es el caso de los valores obtenidos hasta la progresiva 01+800 que se puede apreciar en los cuadros anteriores donde presenta deflexiones máximas en un rango no muy variable. Y a partir de la progresiva 01+800 en adelante se presenta variación de valores de deflexión en un trayecto corto, pasando de $12.00 \cdot 10^{-2}$ mm a $44.00 \cdot 10^{-2}$ mm valores sin corregir. La misma situación se presenta en la progresiva 03+200 donde pasa el tramo de tener valor de $52.00 \cdot 10^{-2}$ mm de deflexión a $16.00 \cdot 10^{-2}$ mm.

Este escenario de elevados valores de deflexión hace referencia al tramo central del estudio del carril derecho.

Valores de deflexiones medidas en el carril izquierdo



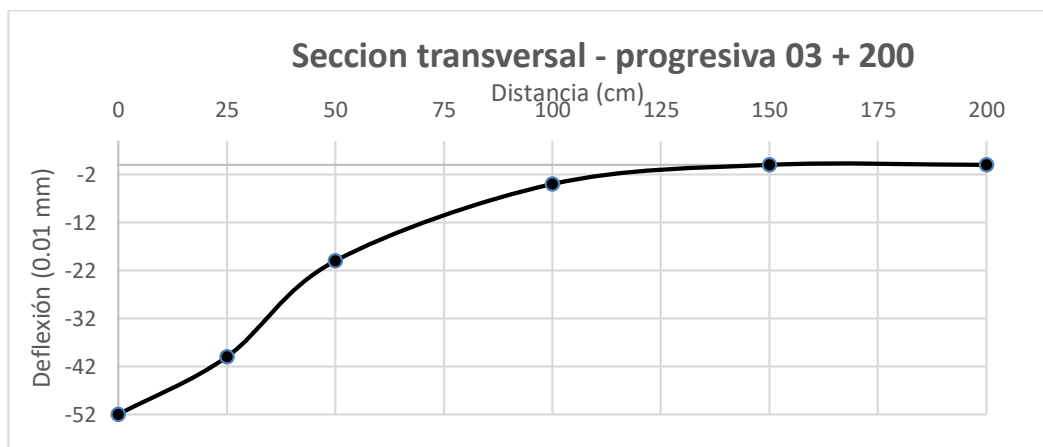
Para el recorrido de lecturas de deflexión en el carril izquierdo recae nuevamente en la progresiva 03+200 donde el valor de deflexión máxima sin corregir pasa de $40.00 \cdot 10^{-2}$ mm a $20.00 \cdot 10^{-2}$ mm mostrando como varía significativamente de valores en un tramo corto.

Finalmente, un caso más de estos en la progresiva 01+200 donde se sigue presentando este cambio de valores que no hace coincidencia con el carril derecho pasando de $32.00 \cdot 10^{-2}$ mm valor sin corregir a $18.00 \cdot 10^{-2}$ mm valor sin corregir.

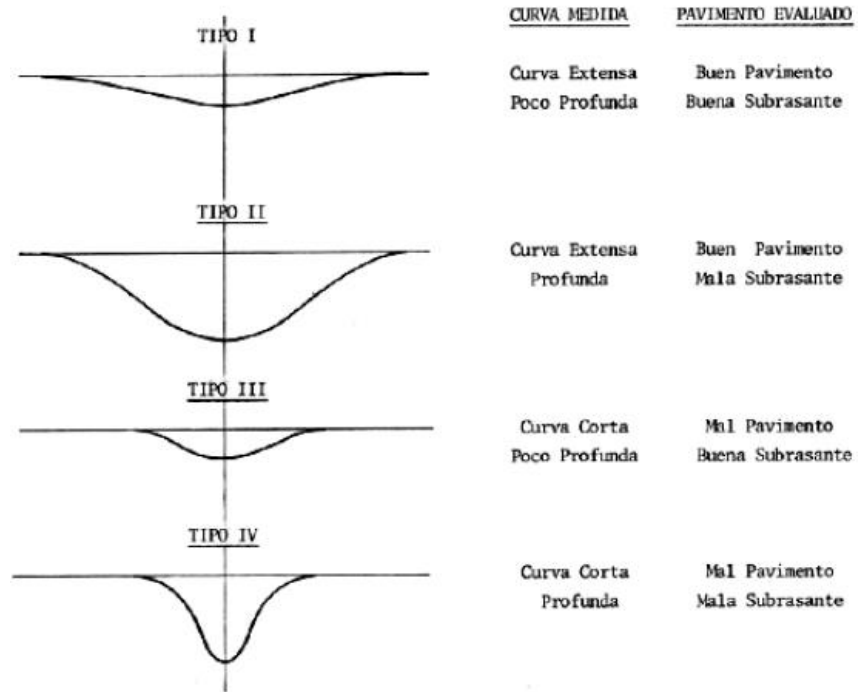
A consecuencia de lo expuesto con anterioridad se toma un cuadro comparativo del libro “Estudio de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos) por Mario S. Hoffman y Pablo M. Del Águila” en el cual se da un significado cualitativo de los diferentes tipos de curvas de deflexiones. Aquí se toma como representativo el valor medido en el carril derecho (ida) perteneciente a la progresiva 03 + 200 en estudio, considerada esta como valor máximo sin corregir de ambos tramos.

Haciendo una comparación gráfica de la sección transversal perteneciente a esta progresiva, se observa que entra en el Tipo I denominada como un buen pavimento con una buena sub rasante, indicando que estructuralmente la capa de pavimento pertenece a un buen orden.

Figura 40. Lectura de deflexión en progresiva 03 + 200 carril derecho sin corregir

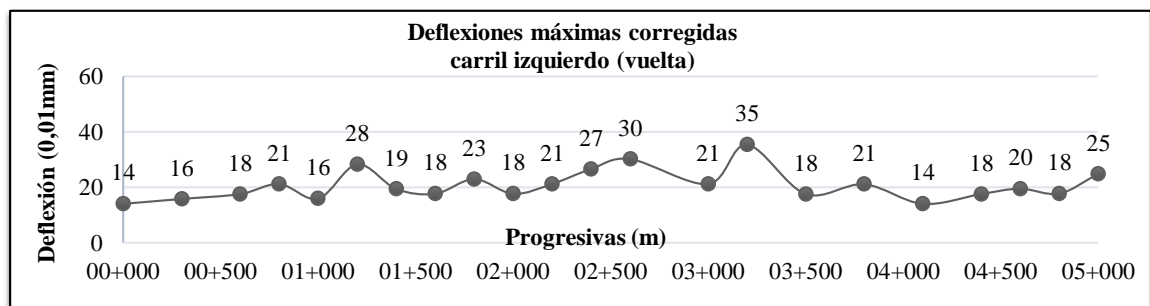
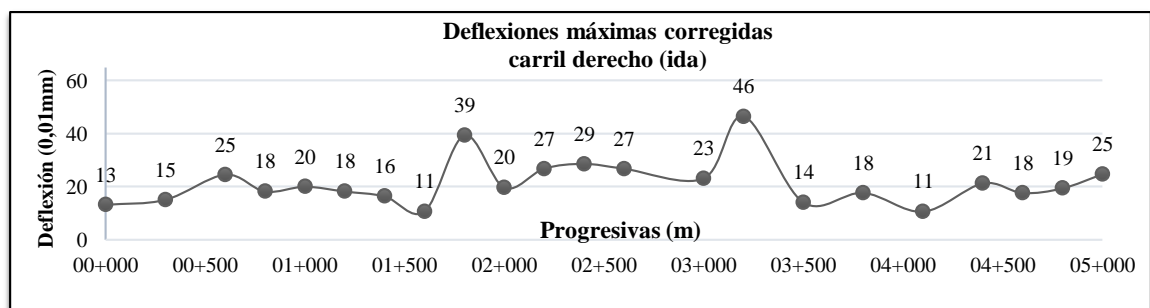


Fuente: Elaboración propia



Resumiendo, existe grandes variaciones en la rigidez del pavimento a consecuencia de las diferencias que existen en la compactación de sus capas para este tramo y en especial para la zona media de estudio.

Comparación de deflexiones máximas corregidas en ambos tramos



Se presenta una desuniformidad en los valores máximos en ambos tramos, revelando una gran dispersión de estos valores de manera individual debido a la variabilidad de las propiedades de los materiales y del proceso constructivo del tramo en estudio ya que este se ejecuta en distintos periodos de tiempo y condiciones climáticas.

También cabe destacar que el principal objetivo de las mediciones de deflexiones radica en poder diferenciar secciones de distinta capacidad estructural en un mismo tramo para poder delimitar secciones en las que se requiere intensificar los estudios o realizar estudios especiales.

Con estos valores de deflexión máximas corregidas anteriores se puede calcular un parámetro denominado “radio de curvatura” el cual suministra una idea elemental de la forma de la deformada del pavimento bajo la acción de la carga.

3.4.2.1 Análisis radios de curvatura

El significado de las medidas de deflexiones puede ser ampliados introduciendo junto a ellas la magnitud de la curvatura de la línea de deflexión en la zona donde ella es mayor, es decir bajo el eje vertical de la carga. Dicha curvatura se la expresa generalmente por el denominado “radio de curvatura”.

El cálculo del radio de curvatura, se basa en la hipótesis de que la línea de deflexiones de la distancia hasta el eje de carga se aproxima a una parábola hasta una distancia superior a 25 cm, sufriendo luego una inflexión hasta tender asintóticamente a la horizontal. La parábola en la zona de máxima curvatura se confunde con el radio en dicho punto, es decir debajo de la acción de la carga que está flexionando el pavimento.

El valor máximo obtenidos de radio de curvatura en el carril derecho (ida) es de 875 m comparado con el valor mínimo de 253 m; y para el carril izquierdo (vuelta) es de 591 m comparado con el valor mínimo de 220 m. considerándose estos valores máximos amplios que hace que el cuenco de deflexiones no sea demasiado cerrado y concentrado donde se ejerce la carga máxima.

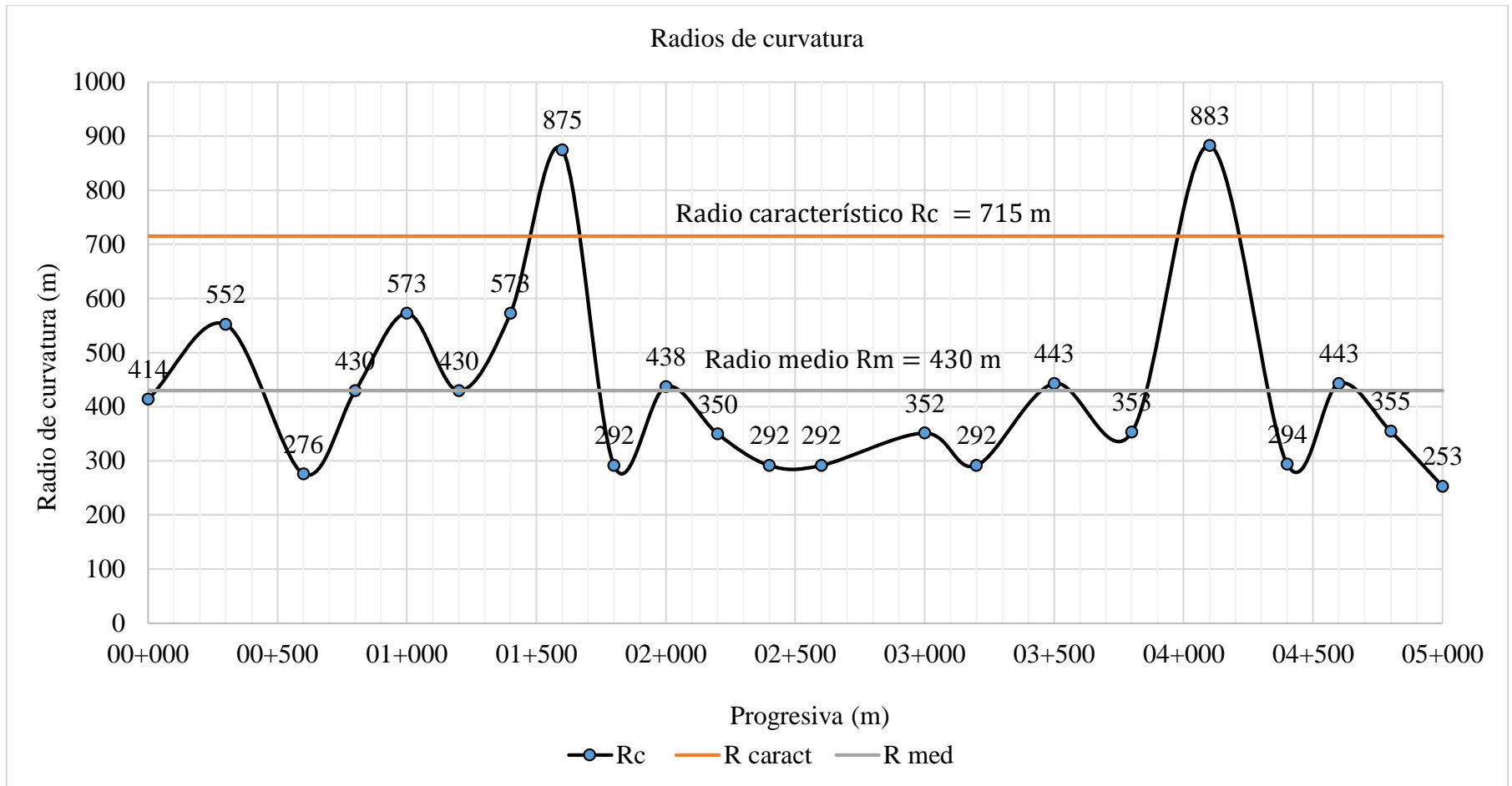
Con la deflexión característica (D_c), definida, se buscan en el tramo todos los puntos que tengan deflexión igual a la deflexión característica y se encuentra el punto más crítico con

respecto al radio de curvatura (se toma el radio de curvatura más crítico, es decir, el más bajo).

Diferentes estudios permiten concluir que los valores del radio de curvatura inferiores a 0 metros, indican la presencia de zonas débiles bajo capas asfálticas, lo que es, sin duda, peligroso para el pavimento, aunque las deflexiones se encuentren dentro de límites admisibles.

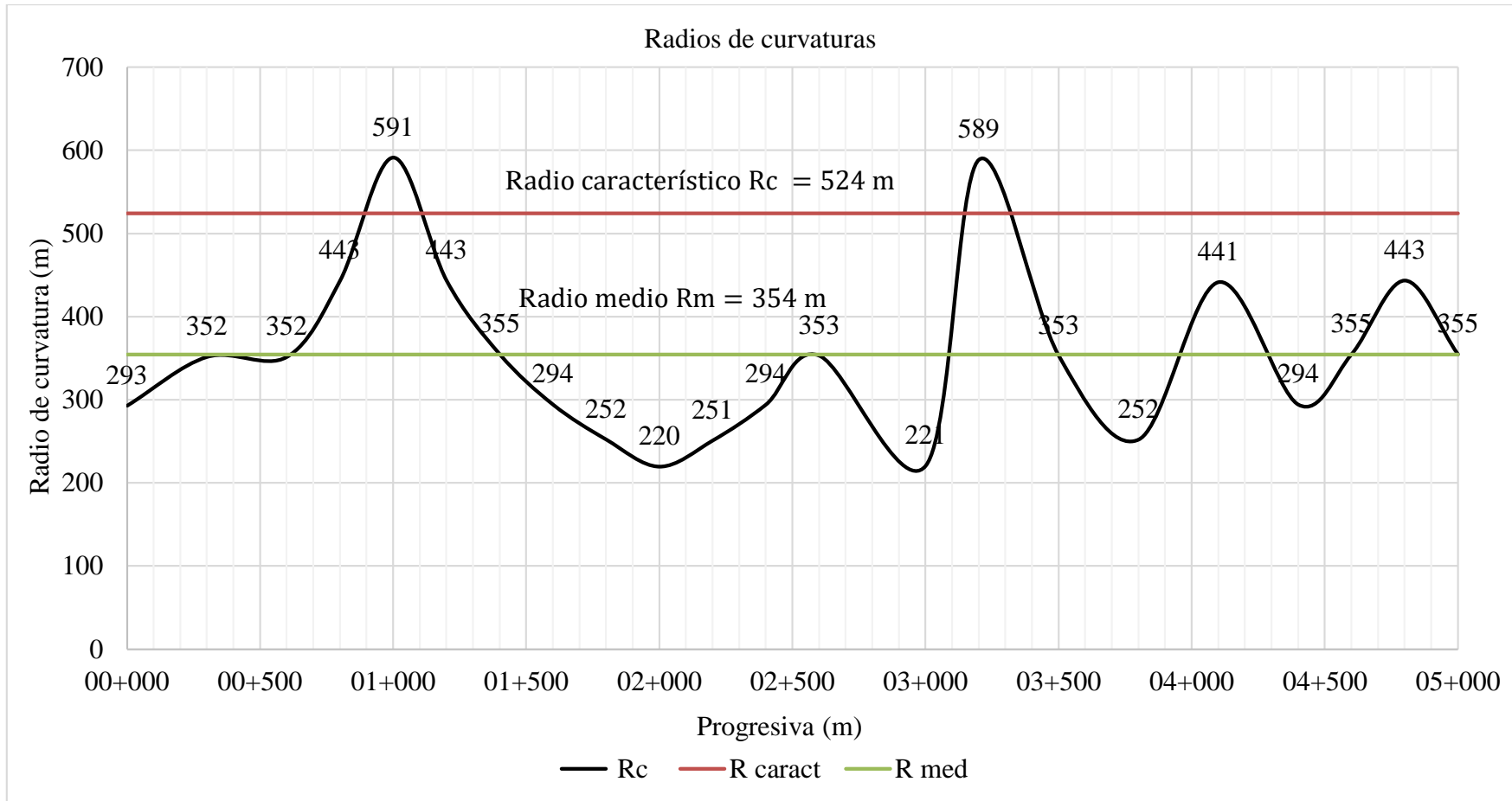
Para valores cercanos a la deflexión característica del tramo derecho (ida) perteneciente a la progresiva 02 + 600 presenta el radio de curvatura más bajo con un valor de 220 m. valor que indica que la deflexión para el valor característico es aceptable.

Figura 41. Análisis de radios de curvatura c. derecho



Fuente: Elaboración propia

Figura 42. Análisis de radios de curvatura c. izquierdo



Fuente: Elaboración propia

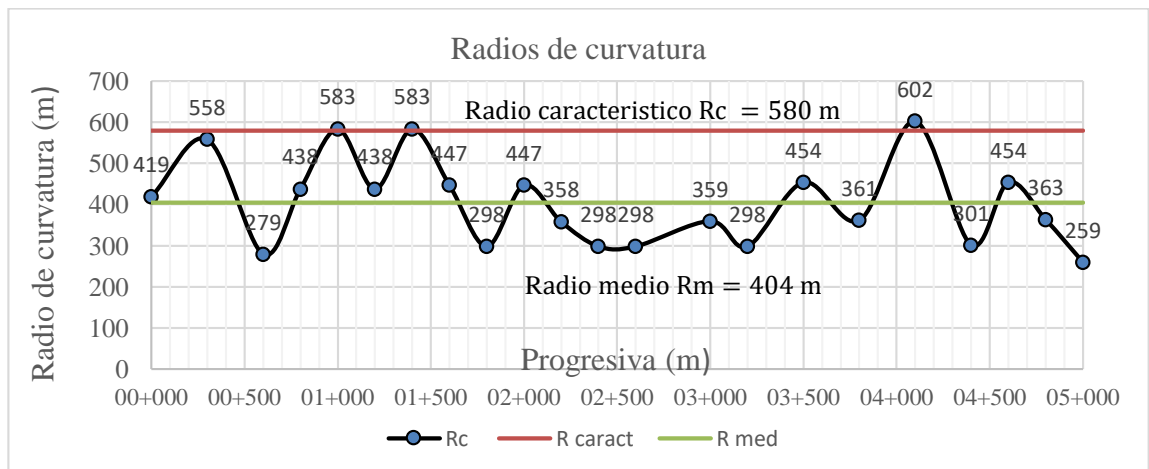
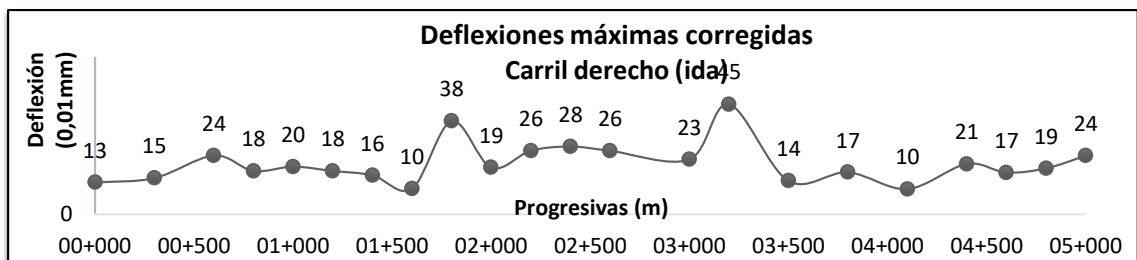
3.4.2.2 Análisis de deflexión y radio de curvatura

Teniendo en cuenta las características y espesor de las capas asfálticas, se podrán diferenciar dos casos límite:

- Si la mayor parte de la deflexión se produce en la sub rasante, se obtendrán grandes radios de curvatura (en relación con la magnitud de la deflexión).
- Si la mayor parte ocurre en las capas superiores, situación indicativa de la deficiente calidad de éstas, se obtendrán pequeños radios de curvatura aún a veces con deflexiones tolerables.

Exponiendo ambas situaciones y basándonos en el cuadro de deflexiones y radios de curvatura se tiene valores relativamente altos y estos obedecen a un comportamiento de que, si las deflexiones son pequeñas, más grandes es el radio de curvatura. Concluyendo nuevamente que las deflexiones se producen en la sub rasante y no en las capas superiores.

En el caso particular de la zona del tramo central de estudio se revelan valores generosos pero muy bajos de radio de curvatura, mostrando gráficamente que en esta sección los valores de deflexión son más elevadas y constantes que en todo el perfil.



3.4.3 Análisis de deflexión admisible con deflexión característica

Deflexión característica		Deflexión admisible
Carril derecho (ida)	$D_c = 35.61 * 10^{-2} \text{ mm}$	$D_{adm} = 81.00 * 10^{-2} \text{ mm}$
Carril izquierdo (vuelta)	$D_c = 29.74 * 10^{-2} \text{ mm}$	

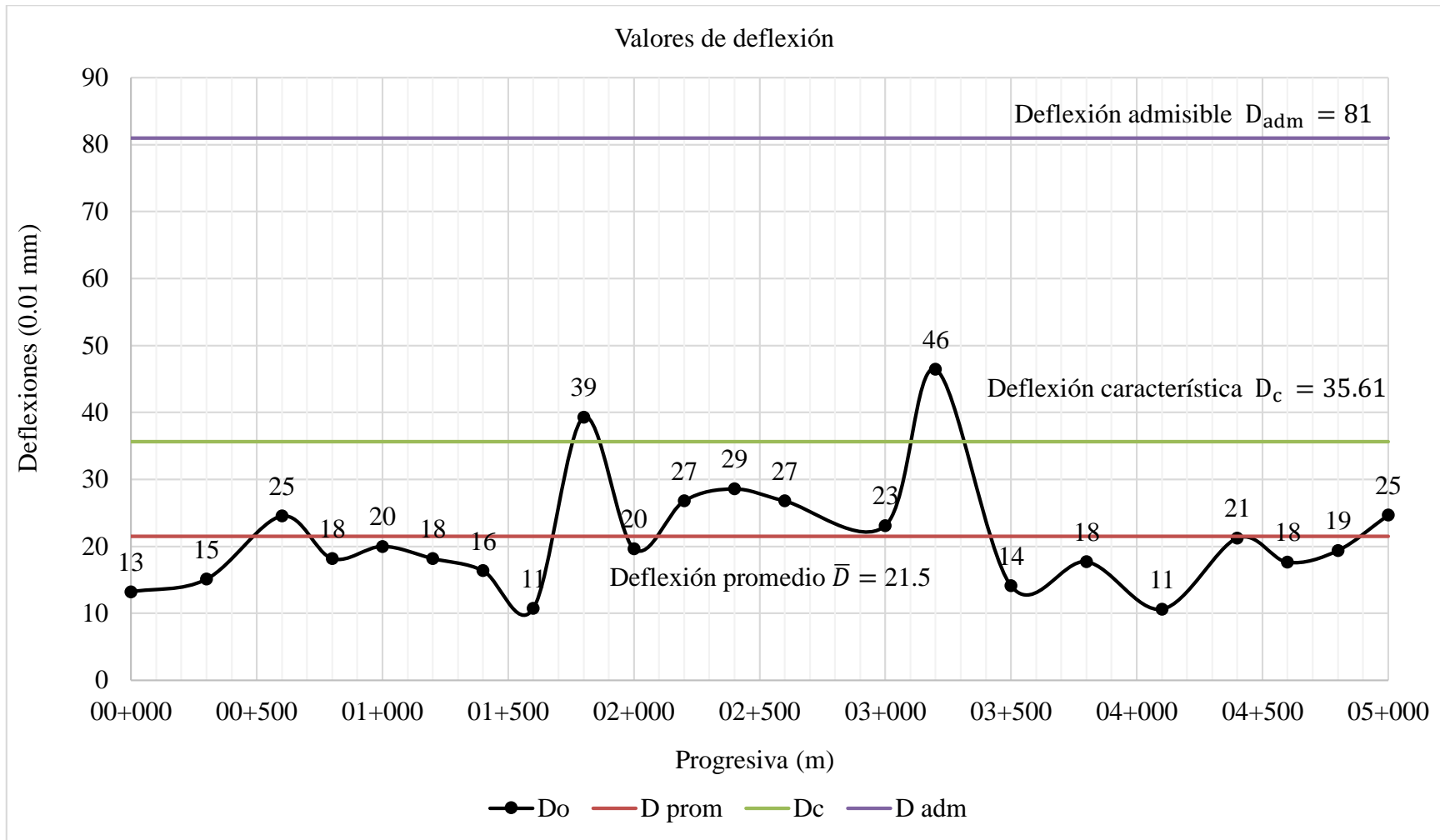
La deflexión característica luego de ser determinada por medio de un procedimiento de cálculo y de corrección por temperatura que presentaba el pavimento se hace una comparación con otro parámetro que sirva de juicio en la determinación de la capacidad estructural del pavimento, llamada esta deflexión admisible.

Ambas deflexiones características presentan una diferencia considerable entre ellas reflejando la variabilidad en un mismo tramo de estudio. El valor de esta deflexión para el carril derecho solo es superado por 2 tramos pertenecientes a las progresivas 01+200 y 03+200 que estas zonas ya se consideran para un estudio más detallado donde haciendo una toma de muestras se observaría el porqué de su comportamiento en base al estado actual. Para el carril izquierdo el valor de la deflexión llega a ser superada por más valores tomando este tramo más uniforme y homogéneo.

La deflexión admisible se determina de por medio de diferentes modelos empíricos y para este caso se aplica la fórmula expuesta por el Instituto de asfalto, que tiene como factor principal el número de ejes equivalentes con el cual fue diseñado y proyectado para un periodo de vida útil del tramo de estudio que este va permitir conocer ese tipo de deflexiones admisibles.

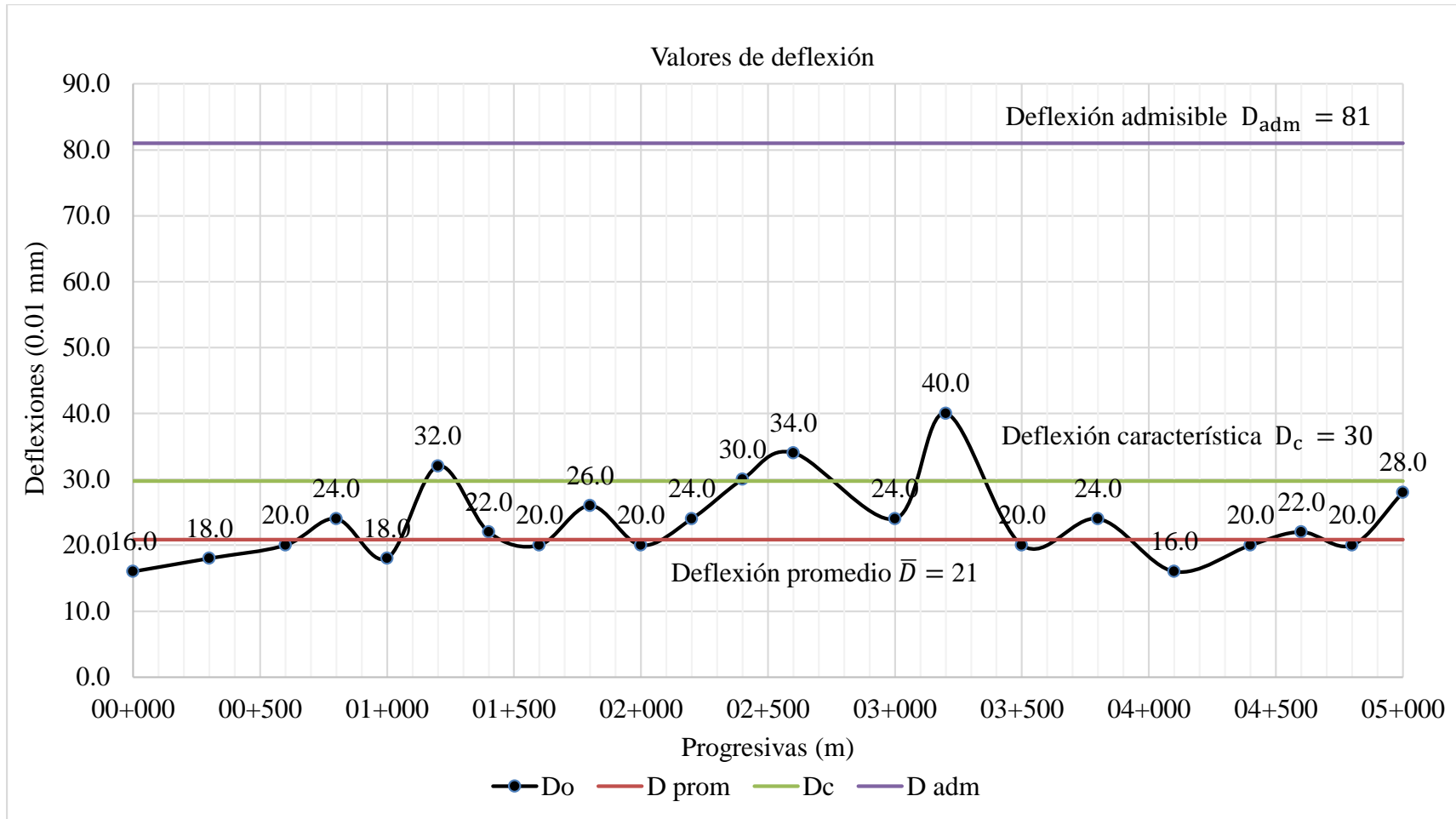
Las deflexiones características resultantes se encuentran muy por debajo de la deflexión admisible de diseño, indicando que las deflexiones presentes no sobrepasan la deflexión admisible pudiendo acreditarle un buen desempeño estructural. Cumpliendo con lo requerido para el periodo de vida la que fue proyectado.

Figura 43. Análisis de la deflexión admisible con la deflexión característica



Fuente: Elaboración propia

Figura 44. Análisis de la deflexión admisible con la deflexión característica



Fuente: Elaboración propia

3.4.6 Comparación de CBR empírico con el CBR In situ

CBR In situ	CBR A partir de deflexiones aplicando el modelo de Hogg
Valor promedio 16.29 %	$\mathbf{CBR_V = 20.90 \mp 0.92}$ $CBR_{sup} = 20.90 + 0.92$ $\mathbf{CBR_{sup} = 21.82}$ $CBR_{inf} = 20.90 - 0.92$ $\mathbf{CBR_{inf} = 19.98}$
Resumen y Análisis $CBR_{sup} = 21.82 \%$ $CBR_{prom} = 20.90 \%$ $CBR_{inf} = 19.98 \%$ $CBR_{In\ situ} = 16.29 \%$	

Fuente: Elaboración propia

El valor del CBR obtenido por medio de medición directa en campo “CBR In situ” presenta un valor promedio de **16.29 %** encontrándose bajo la calificación cualitativa del suelo de regular – buena, este valor se cómo valor de referencia aceptable de la sub rasante.

Entrando en comparación con el valor de CBR obtenido mediante la aplicación del modelo de Hogg a partir de deflexiones obtenidas en campo mediante la utilización de la viga Benkelman nos da como resultado el valor de 19.98 % este mismo encontrándose igualmente en la clasificación de regular – buena, este valor se encuentra por encima del valor obtenida en la medición en campo **CBR In situ** 16.29 % pero perteneciente a la misma clasificación, dando esta comparación como validada ya que al ser el modelo de Hogg un modelo matemático se aproxima a la realidad.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Finalizando el proceso de análisis del presente proyecto de aplicación se puede establecer las siguientes conclusiones:

- Se obtuvieron las deflexiones máximas en el tramo de aplicación El Cruce – Valle de la Concepción aplicando la metodología de evaluación no destructiva mediante el uso de la viga Benkelman cumpliendo así uno de los principales objetivos que era definir y hacer una serie de comparaciones con diferentes parámetros y conocer el comportamiento de la estructura en su conjunto y por secciones.
- La evaluación deflectométrica usando la viga Benkelman permitió hallar valores de deflexión medidas a nivel de carpeta asfáltica y nos permite verificar la condición estructural del pavimento, considerando el método propuesto por el Instituto de Asfaltos que define la deflexión admisible según el número de ejes equivalentes, que la deflexión característica debe ser menor a la deflexión admisible ($D_c < D_{adm}$), de acuerdo a los cálculos realizados en el presente trabajo la deflexión característica del pavimento que se obtuvo es **35.61 mm-2** y es menor a la deflexión admisible que es **81 mm-2**, por lo tanto se concluye que no existen fallas de origen estructural en el pavimento en estudio.
- Para el área que abarca la zona media del tramo en estudio se presentan variaciones aleatorias en la rigidez del pavimento producidas por varios factores, que entre ellos están la diferencia en la compactación de sus capas, las características de los materiales que están producen grandes variaciones en las deflexiones máximas en trayectos cortos, es decir, progresivas contiguas.
- A medida que la temperatura ambiente y la de las capas bituminosas son mayores, la deflexión del pavimento se incrementa a causa del ablandamiento que sufre el asfalto, con el consecuente decrecimiento en la rigidez de la mezcla. Este efecto es particularmente notorio cuando las deflexiones se miden mediante el sistema de carga estática que viene siendo el caso de la aplicación de la viga Benkelman. Para prevenir errores de interpretación, no es recomendable realizar medidas de deflexión cuando

la temperatura de las capas asfálticas supere 35° C, siendo deseable que no exceda de 30° C.

Bajo esta recomendación expuesta en el Instituto Nacional de Vías, los valores de temperaturas tomadas al asfalto del tramo en estudio con un termómetro de piso sobrepasan los valores recomendados, siendo estos de:

Asfalto	°C	32.0	40.0	44.0	44.0	44.0	44.0	45.0	44.0	47.0	46.0	47.0
Asfalto	°C	45.0	47.0	46.0	46.0	45.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	47.0

Cuando la temperatura es muy alta, comienza a intervenir la deformación plástica de la mezcla, debido al predominio de las propiedades viscosas del asfalto, lo que se traduce en una disminución de la respuesta elástica del pavimento y, por consiguiente, de las deflexiones.

Valores que afectarían a la interpretación en un cierto grado de los resultados y del análisis de los resultados, y con ello se podrían presentar valores menores a las deflexiones que se tiene si estuviere en temperatura normal recomendada, afectando a la deflexión remanente o residual que es cuando la sollicitación aplicada deja de actuar y la recuperación del pavimento no es total quedando este material con una deflexión remanente.

- Las deflexiones combinadas con los radios de curvatura expresan el comportamiento de la estructura y da como resultado que las deflexiones se presentan en la sub rasante.
- Los resultados de deflexiones que se exponen vienen a ser valores particulares del tramo elegido pero estos mismos se los puede utilizar para hacer una comparación con tramos aledaños y similares condiciones de clima y diseño estructural del departamento de Tarija.
- Los valores de deformación presentadas se pueden tomar como valores límites para una carga máxima tomando estos resultados que se verán reflejados para las condiciones de vida al que fue proyectado.
- Las deformaciones aceleradas obtenidas en laboratorio se hacen referentes a varias condiciones de carpetas asfálticas provenientes a las mismas características de diseño y estructural y se la puede tomar como base para futuros análisis.

4.2 Recomendaciones

Se presenta las siguientes recomendaciones:

- Para tener el peso requerido por el ensayo de medición de deflexiones, es necesario realizar el pesaje de la volqueta, y su forma correcta es que solamente el eje trasero este en contacto con la balanza, dejando fuera la parte de la cabina.
En la ciudad de Tarija las balanzas no cuentan con el pesaje por eje estandarizado así que se debe tener definido los ejes delantero y trasero.
- El procedimiento de medición de deflexiones aplicando la Viga Benkelman resulta ser relativamente sencillo, pero de gran incertidumbre en la toma de lecturas del deformímetro, pues estas se deben realizar justo en el momento en el que el vehículo avanza determinado número de centímetros; al ser una longitud tan corta se dificulta no solo la toma de lecturas sino el control de la velocidad que se debe aplicar, por todo esto se debe tener en cuenta estos aspectos bajo control riguroso y un número de operarios mayor a 3 personas más el operario de la volqueta.
- Las mediciones de deflexión en campo se las debe ejecutar en clima que no lleguen a superar los 30°C ya que estos afectan de manera negativa los valores medidos de deflexión ya que estas deflexiones tienden a aumentar considerablemente.
- Para evitar cualquier inconveniente de tránsito llevar la señalización e indumentaria de trabajo correspondiente para ayudar a manejar el tráfico debido a que se realiza por al menos media hora un corte de carril. Siendo aún más apropiada esta acción los días feriados o fines de semana donde la afluencia vehicular se reduzca considerablemente.
- A consideración de futuros trabajos de medición en plataforma con el sistema de medida de deflexión bajo carga estática, se recomienda la viga Benkelman doble ya que en esta sus medidores ya se encuentran establecidos a una distancia de 25 cm, expresándose mayor exactitud en los resultados y empleando así un menor tiempo y personal de apoyo.
- Para la mejor apreciación del trabajo de campo y todo el trabajo previo se debe contar con apoyo de técnicos profesionales debido a diversos factores que influyen en la toma de lecturas.