

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El avance socio-económico de la ciudad de Tarija y las poblaciones aledañas demanda que las vías de comunicación terrestres se encuentren en buenas condiciones, para facilitar el transporte urbano, los intercambios comerciales, promocionar el turismo, entre otros y de tal forma mejorar las condiciones de vida de toda la población y sus alrededores.

Si el terreno existente conocido como la subrasante no asegura la durabilidad y estabilidad que garantice el buen comportamiento de la estructura del pavimento se tiene dos opciones, el de mejorar el suelo existente para economizar y disminuir el impacto ambiental o el de sustituir el suelo realizando grandes movimientos de tierra.

Para la evaluación del estado estructural de pavimentos flexibles, semirrígidos y rígidos, se acude a equipos modernos como el Dynaflect, Road Rater y deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer o FWD); siendo estos ciertamente costosos para verificaciones cortas.

Resulta provechoso la utilización de un equipo más económico y sencillo como la Viga Benkelman (VB), ya que no altera la integridad del sistema y consiste en tomar deflexiones a nivel de la superficie del pavimento.

El presente trabajo busca mostrar de forma sistemática el procedimiento y la toma de datos para realizar la medición de las deflexiones del pavimento flexible del tramo de las tres vías de la Av. Jaime Paz Zamora desde la esquina de la calle España hasta la calle Rafael Pabón, con la viga Benkelman, esta medición se basa en que las curvas de deflexiones contienen considerable información de las características del pavimento y su subrasante; para realizar la interpretación de dicha información se utilizan distintas ecuaciones

correlacionadas con los resultados obtenidos de la viga Benkelman, llegando a determinar de esta forma los parámetros iniciales de la subrasante.

Este estudio se elabora con la finalidad de conocer si existe un deterioro estructural en el pavimento flexible analizado y de tal forma poder concretar una pronta intervención de las autoridades pertinentes para salvaguardar el tramo en estudio y así mejorar la transitabilidad de los ciudadanos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los pavimentos flexibles son evaluados superficialmente, debido a que se presentan daños en la superficie como hundimientos, fisuraciones, deformaciones, abultamientos, entre otros sin presentar a simple vista problemas estructurales. Sin embargo, el realizar una evaluación estructural mediante deflectometría con la viga Benkelman; será de grandiosa ayuda para que tanto las autoridades y los gobiernos locales tomen consciencia a cerca del estado de las carreteras de la ciudad, y específicamente del tramo a analizar, ya que en su gran mayoría en el área urbana son diseños de estructuras de pavimentos flexibles que se encuentran deteriorados, pese a que se realiza una rehabilitación superficial por distintas fallas que presentan, esto no es útil porque muchas estructuras de los pavimentos se van deteriorando por causa de una baja capacidad de soporte de la subrasante (CBR) y en algunos casos debido a que no se realiza una evaluación estructural temprana, el pavimento continua deteriorándose con el paso del tiempo.

Realizar el estudio de evaluación estructural del tramo de las tres vías de la Av. Jaime Paz Zamora desde la esquina de la calle España hasta el ingreso al aeropuerto, contribuiría para tomar oportunas decisiones sobre los problemas ocurridos en el pavimento y poder actuar a tiempo, evitando distintas complicaciones que se puedan presentar por fallas en la estructura del pavimento, ya que se habla de una vía con mucha afluencia de tráfico vehicular. Se busca evitar el avance del deterioro del tramo, el cual podría llevar al cierre de la vía para trabajos de mantenimiento generando molestia en la población y congestión vehicular. Dicho estudio tendrá beneficios principalmente para la población del área

urbana de la ciudad de Tarija porque gracias a él se podrá intervenir a tiempo los pavimentos que presenten deterioros y se podrá realizar los respectivos mantenimientos en las zonas afectadas, generando conformidad con la ciudadanía para su libre tránsito ya sea en vehículo, motocicleta, bicicleta o a pie, en un pavimento sin fallas superficiales ni estructurales.

En el presente trabajo se busca desarrollar la evaluación estructural de la subrasante utilizando la Viga Benkelman, que tiene como finalidad dar a conocer el deterioro estructural en el tramo de estudio, con los datos obtenidos de las mediciones de las deflexiones se puede determinar los parámetros de la subrasante (CBR) a partir de correlaciones con distintas ecuaciones planteadas y así poder determinar las condiciones de estado del pavimento.

El proyecto a realizar permitirá observar procedimientos y resultados de ensayos que normalmente no se realizan en los laboratorios y permitirá complementar los conocimientos sobre evaluación de pavimentos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Analizar la subrasante de baja capacidad portante de las tres vías de la Av. Jaime Paz Zamora, mediante la viga Benkelman, la cual nos permitirá conocer las características y parámetros iniciales de la subrasante a partir de ecuaciones correlacionadas con los resultados de la deflectometría.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar los pavimentos flexibles y sus distintos componentes, además de su comportamiento estructural en carreteras.
- Se determina la ubicación del tramo de las tres vías de la Av. Jaime Paz Zamora desde la esquina de la calle España hasta el ingreso al aeropuerto, en el cual se desarrollará la investigación.
- Caracterizar los materiales utilizados en la investigación del presente tramo de estudio.
- Realizar el ensayo de deflectometría con la viga Benkelman en el tramo seleccionado.
- Analizar los resultados obtenidos de la viga Benkelman y determinar los parámetros de subrasante a partir de ecuaciones de correlación.
- Establecer las conclusiones y recomendaciones sobre el estudio realizado, sobre los parámetros de la subrasante obtenidos indirectamente con la viga Benkelman.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.4.1 Situación problemática

Los pavimentos flexibles de nuestra ciudad se encuentran en un deterioro paulatino haciendo costosa la transitabilidad por las zonas afectadas, se habla de lugares pavimentados hace bastante tiempo los cuales recibieron el respectivo mantenimiento y pese a eso se observa el deterioro en la vía, como también existe la presencia de fallas en tramos que fueron pavimentados recientemente, esto conlleva a una difícil circulación por dichos sectores, ya sea con cualquier medio de transporte que utilicen los ciudadanos.

Especialmente se pueden ver afectados los sectores rurales del departamento ya que realizan de forma frecuente el traslado de sus alimentos para ser comercializados en la ciudad, los cuales tiene una alta probabilidad de sufrir accidentes al momento de transitar

por vías en mal estado generando pérdidas irreparables para el sector. Es considerado también un factor por el cual suceden distintos accidentes automovilísticos, como incidentes con personas que circulan a pie, pues al momento de transitar por vías en mal estado los conductores tratan de esquivar los daños presentes en el asfalto para evitar perjuicios en sus vehículos generando trágicos desenlaces.

Se debe resaltar que en la actualidad existen en circulación vehículos de gran magnitud como ser camiones de alto tonelaje, tráileres, maquinaria pesada, etc. los cuales transitan por vías no autorizadas para su dimensión y peso; generando desgaste en la estructura del pavimento, siendo así, que estos no están diseñados para soportar cargas de gran tamaño incrementando de esta manera el volumen de tráfico en la zona.

Este es un motivo que mueve a la población a pedir de forma persistente la debida atención a las vías que transitan, para que así las autoridades pertinentes tomen consciencia del daño que se genera a la población al tener dichos tramos en tan malas condiciones y se pueda acceder a un mantenimiento temprano evitando de tal manera daños irreparables en la vía.

La disconformidad que existe de la población es notoria también con los turistas que vienen a nuestra ciudad a pasar momentos agradables conociendo la misma, ya que al instante de circular por las calles es evidente la falta de atención que reciben los distintos tramos ya sea dentro de la mancha urbana o en poblaciones aledañas donde tienen que pasar hasta horas en automóviles para llegar al destino que se establecen, dejando notar el poco avance en cuanto a mantenimiento con sus rutas que tiene la ciudad.

Para llegar a obtener las condiciones en las que se encuentra el material de la subrasante sobre el cual está fundado el pavimento, se pueden elaborar ensayos destructivos y no destructivos; siendo los destructivos más desfavorables porque conlleva a la destrucción de toda la estructura del pavimento y para ello es conveniente emplear los métodos no destructivos entre ellos se encuentra la utilización de la deflectometría la cual nos ayudaría para obtener las condiciones mecánicas de comportamiento del material de la subrasante.

1.4.2 Problema

¿Será que a través de la deflectometría utilizando la viga Benkelman y correlacionando con las características de la subrasante pueda encontrar los valores que correspondan a este tipo de materiales?

1.5 DEFINICIÓN DE VARIABLES

1.5.1 Variable independiente

Características y propiedades del material de la subrasante.

1.5.2 Variable dependiente

Deflectometría utilizando la viga Benkelman sobre el pavimento para obtener las características y propiedades del material de la subrasante.

1.5.3 Operacionalización de variables

Tabla 1: Operacionalización de variables

Variable	Concepto	Medición	Unidad
Independiente: Características y propiedades del material de la subrasante.	La subrasante es el terreno que sirve de apoyo para el pavimento, después de haber realizado corte o relleno. El terreno	CBR	%

	<p>debe garantizar resistencia porque recibirá todas las cargas del tránsito.</p> <p>Una de las propiedades de gran importancia de la subrasante es la capacidad portante, ya que el espesor que debe tener el pavimento depende en su mayoría de ella.</p> <p>El ensayo para obtener un valor de estimación de las propiedades de la subrasante es el valor de soporte (CBR)</p>		
<p>Dependiente: Deflectometría utilizando la viga Benkelman sobre el pavimento para obtener las características y propiedades del</p>	<p>Se refiere a la evaluación del pavimento mediante deflectometría, con la viga Benkelman, para así obtener las</p>	<p>Deflectometría Deflexión máxima Radio de curvatura</p>	<p>mm. mm.</p>

material de la subrasante.	propiedades y características del material que se encuentra en la subrasante, a partir de correlaciones realizadas con los resultados de la deflectometría	Propiedad de la subrasante CBR	%
----------------------------	--	--	---

Fuente: Elaboración propia

1.6 HIPÓTESIS

Si realizamos el análisis del tramo de las tres vías de la Av. Jaime Paz Zamora desde la esquina de la calle España hasta la calle Rafael Pabón de la ciudad de Tarija, con ayuda de la viga Benkelman, entonces se podrá determinar las características y propiedades del material de la subrasante, mediante ecuaciones correlacionadas con los resultados de la deflectometría.

1.7 DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1 Proceso de aplicación

Para realizar la aplicación del ensayo del presente proyecto, primeramente, se debe preparar los segmentos en los cuales se va realizar la medición.

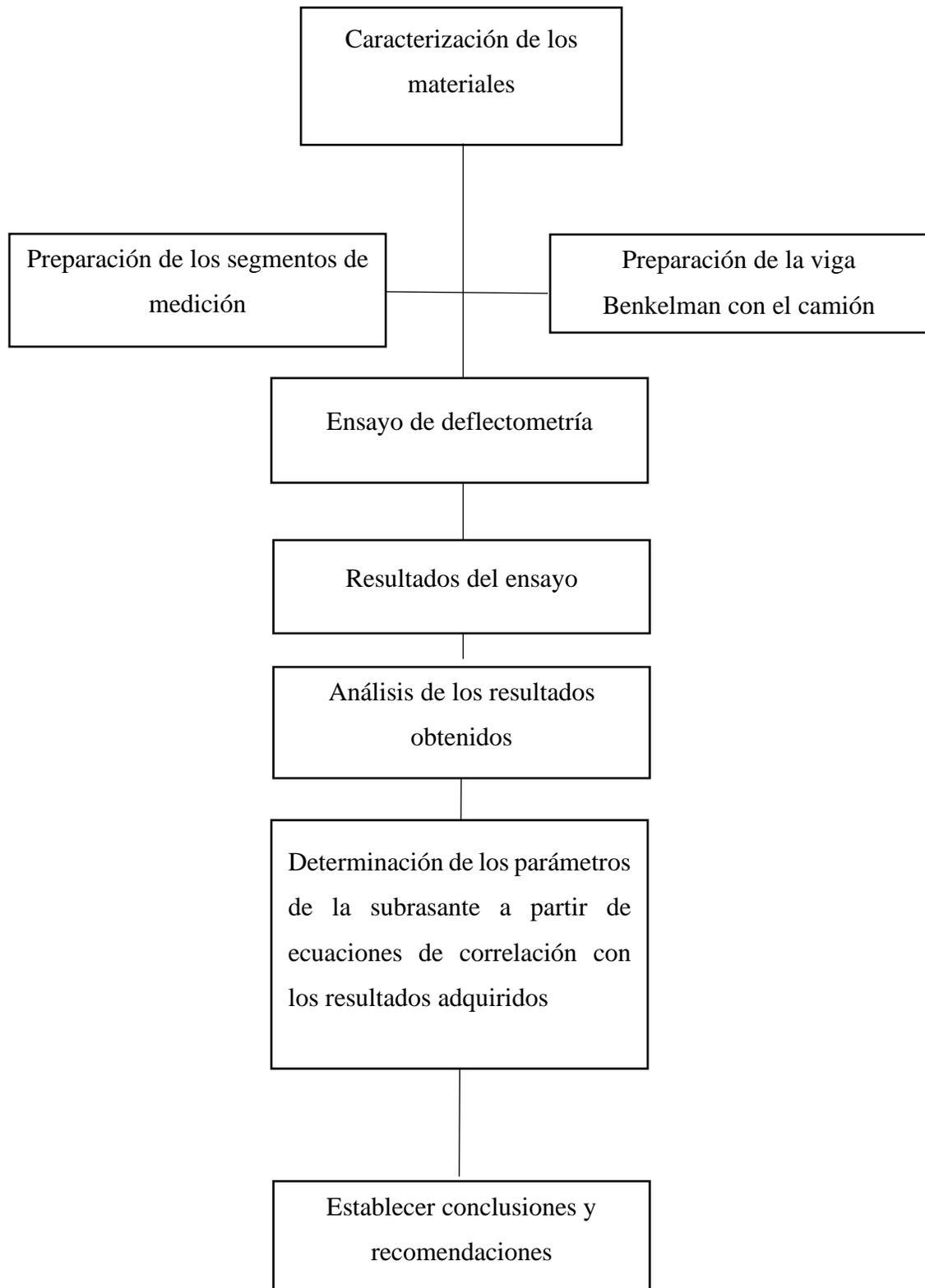
El ensayo se realizará en tres carriles de aproximadamente un kilómetro de longitud, donde obtendremos en total treinta puntos de análisis, distribuidos cada cien metros, haciendo un total diez puntos por carril.

Conjuntamente se debe preparar la viga Benkelman, colocándola entre los neumáticos del eje trasero de un camión que estará cargado con material, el cual permita obtener un peso de acuerdo a norma para ejecutar el ensayo. Se debe tomar como punto de referencia una varilla metálica adosada en la parte trasera del camión, la misma efectuará una marca en la viga, para que en adelante solo sea necesario hacerlas coincidir (la marca con la varilla) para asegurarse que el extremo de la viga coincide con el centro de las llantas, al momento de iniciar las mediciones. Se puede efectuar sucesivas marcas a distancias elegidas a las cuales se desee medir deflexiones adicionales (puede ser de 30, 40 y 50 cm) en segmentos de cada 100 m.

Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la cadena vertical y la marca inicial, se verificará que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se procederá a realizar el ensayo de deflectometría, mientras el camión se desplaza muy lentamente se tomará lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con la primera y segunda marcas adicionales y una lectura final cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo y que el indicador del dial ya no tenga movimiento. (aproximadamente 5.00 m).

Los resultados de la medición serán tabulados en una tabla de registro, obteniendo de esta manera datos de deflexión máxima y radio de curvatura, los cuales serán analizados para posteriormente poder determinar los parámetros de la subrasante del tramo en estudio a partir de ecuaciones de correlación con los resultados del ensayo. Y de esta manera obtener la capacidad portante del pavimento seleccionado.

Finalmente, al establecer las conclusiones del proyecto, se dará respuesta al problema planteado obteniendo los valores de capacidad portante del tramo analizado, mediante deflectometría con una herramienta no destructiva como es la viga benkelman, que puede ser aplicada en los pavimentos flexibles, a través de un previo análisis. También se plantearán las recomendaciones recabadas en función a lo observado al momento de la realización de todo el proyecto.



1.8 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Se realizará el análisis no destructiva del tramo seleccionado, utilizando la viga Benkelman, esta valoración nos permitirá conocer las características y parámetros iniciales de la subrasante a partir de ecuaciones correlacionadas con los resultados de la deflectometría, para poder establecer acciones que se puedan realizar a tiempo en los tramos con deterioro. Y de esta manera elaborar las conclusiones y recomendaciones para la zona de estudio.

El capítulo uno estará constituido por el resumen del proyecto, donde se da a conocer los objetivos y la problemática planteada para proponer soluciones mediante el ensayo de deflectometría con la viga Benkelman.

El capítulo dos abarcará el análisis de toda la bibliografía sobre la correlación deflectométrica en pavimentos flexibles, donde se hará énfasis a las ecuaciones propuestas por distintos autores, para obtener parámetros de la subrasante en estudio.

En el capítulo tres se realizará el análisis del pavimento flexible con la viga Benkelman, en tramos de avenida de la ciudad, dando pie a la aplicación de la correlación entre la deflectometría y las propiedades de la subrasante.

Para culminar, en el capítulo cuatro se establecerán las conclusiones presentando el cumplimiento de los objetivos específicos, dando respuesta al problema propuesto y corroborando la hipótesis planteada. Con respecto a las recomendaciones, las mismas serán redactadas de acuerdo a lo observado en la realización del ensayo.

CAPÍTULO II

**ASPECTOS GENERALES SOBRE LA
CORRELACIÓN DEFLECTOMÉTRICA EN
PAVIMENTOS FLEXIBLES**

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES SOBRE LA CORRELACIÓN DEFLECTÓMETRICA EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.1 PAVIMENTO

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente

Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son los siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías además de que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza, y por consecuencia resultan los más económicos.

La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material que la constituye, también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo; siendo dos factores importantes la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

2.2 CARACTERÍSTICAS QUE DEBE REUNIR UN PAVIMENTO

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico.
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito. (Montejo Fonseca, 2006, pág. 2)

2.3 PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS

2.3.1 Respuestas y comportamiento

Aunque en apariencia las estructuras de pavimento son simples son en realidad muy complicadas, debido a la gran cantidad de variables que influyen sobre el comportamiento del mismo, por este motivo una gran cantidad de simplificaciones deben ser hechas a fin de analizar la respuesta y comportamiento de un pavimento.

La respuesta estará dada en términos de esfuerzos y deformaciones en cada capa de pavimento, el comportamiento en termino de las condiciones estructurales y funcionales son obtenidos a partir de relaciones empíricas con la respuesta del pavimento y el grado de deterioro (Menéndez Acurio,2009, pág. 09).

2.4 TIPOS DE PAVIMENTOS

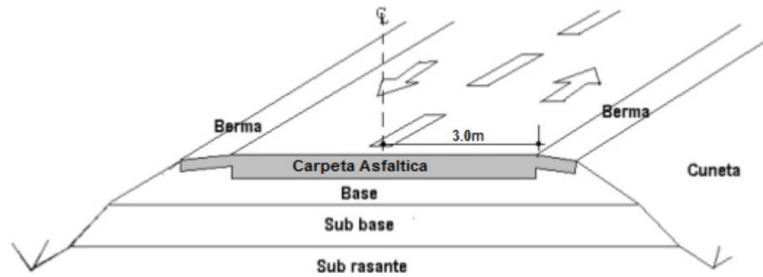
Se tiene principalmente los siguientes tipos de pavimentos:

2.4.1 Pavimentos flexibles

En el siglo XX se construyeron numerosas autopistas y carreteras basadas en pavimentos flexibles, esto permitió desarrollar muchos criterios para determinar el espesor de asfalto, fallas ocasionadas en el pavimento y una serie de parámetros en términos de diseño. Hasta la fecha se ha logrado un incremento en técnicas constructivas y de tecnología del asfalto, generalmente gracias a métodos empíricos.

Este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante, puede prescindir de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra.

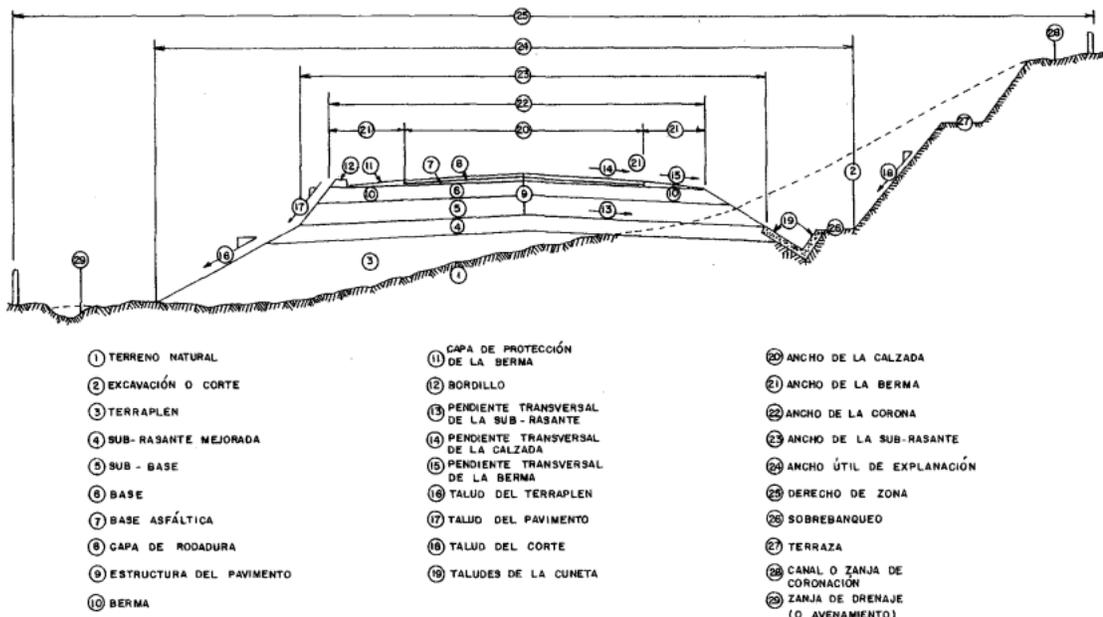
Figura 1: Sección típica de un pavimento flexible



Fuente: Ramos Wilder

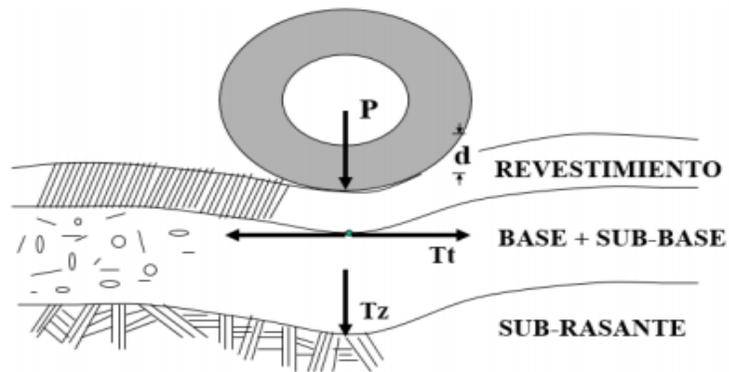
Un pavimento flexible resulta más económico en su construcción inicial, tiene un periodo de vida de entre 10 y 15 años, pero tienen la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil. Está constituido por una capa asfáltica, de sub-base y de base, apoyada sobre un terreno de fundación llamada subrasante.

Figura 2: Sección típica de un pavimento



Fuente: (Montejo Fonseca,2001)

Figura 3: Efectos- cargas de un pavimento flexible

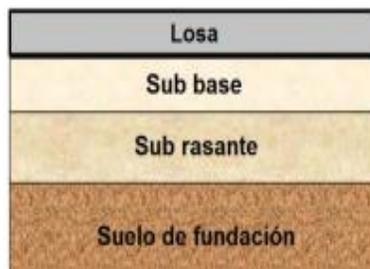


Fuente: Ponencia “Pavimentos económicos para un país en desarrollo” – Ing. Jorge Luis Yamunaque Miranda

2.4.2 Pavimentos rígidos

Son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto apoyada sobre la subrasante o sobre una capa, de material seleccionado la cual se denomina sub base del pavimento rígido. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento (Montejo Fonseca,2006)

Figura 4: Sección típica de un pavimento rígido



Fuente: Montejo Fonseca

2.5 ETAPAS DE LA VIDA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

- FASE DE CONSOLIDACIÓN: Disminución desacelerada del valor de la deflexión, la cual se estabiliza al final de esta.
- FASE ELÁSTICA: La deflexión se mantiene aproximadamente constante. Esta define la vida útil del pavimento.
- FASE DE FATIGA: Crecimiento acelerado del nivel de deflexión del pavimento se exteriorizan los efectos de fatiga: fisuras, grietas y acumulación de deformaciones permanentes bajo repeticiones de cargas.

Figura 5: Etapas de la vida de un pavimento flexible



Fuente: Ponencia “Pavimentos económicos para un país en desarrollo” – Ing. Jorge Luis Yamunaque Miranda

2.6 ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO

La estructura que se apoya sobre el terreno de fundación o subrasante, y que está conformado por capas de materiales de diferentes calidades y espesores, que obedecen a un diseño estructural, se denomina pavimento. La estructura del pavimento está destinada a soportar las cargas provenientes del tráfico

2.4.1 Carpeta asfáltica

La carpeta asfáltica debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente y debe resistir los efectos abrasivos del tránsito.

- **Impermeabilidad.** Hasta donde sea posible debe impedir el paso del agua al interior del pavimento.
- **Resistencia.** Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento.

Su función principal es proteger la base de los esfuerzos destructivos del tránsito, impedir el paso del agua de lluvia a las capas inferiores ya que su saturación podría producir un colapso de todo el paquete estructural. Además, debe resistir al intemperismo y los efectos abrasivos del tránsito ya que es la capa que estará en contacto directo con él. Se puede decir que la carpeta asfáltica tiene características funcionales y estructurales, esto lleva fundamentalmente a obtener un contenido óptimo de asfalto para garantizar que la carpeta cumpla con lo anteriormente mencionado; se debe tener en cuenta que un exceso de asfalto podría causar una pérdida de estabilidad en la carpeta asfáltica incluso hacer resbalosa la superficie. (Montejo Fonseca, 2001)

2.4.2 Base

Esta capa de pavimento se coloca por encima de la capa sub-base y debajo de la carpeta asfáltica. Tiene por finalidad resistir los esfuerzos producidos por las cargas del tránsito, distribuirlos y transmitirlos a la sub-base hasta llegar a la subrasante. Las bases pueden ser construidas de materiales granulares como piedras trituradas, gravas o mezclas naturales de agregados, pero al ser un elemento que proporciona resistencia, en algunos casos es necesario utilizar mezclas bituminosas, mezclas estabilizadas con cemento portland o algún otro ligante con la finalidad de garantizar una resistencia adecuada, este tipo de bases son llamadas “estabilizadas”. En algunos casos la base debe drenar el agua

que se introduce a través de la carpeta asfáltica e impedir la ascensión capilar del agua procedente del subsuelo.

2.4.2.1 Características de la capa base

El material que conforma la capa base debe cumplir los siguientes requisitos:

- Los agregados gruesos deberán tener un porcentaje de desgaste de los Ángeles inferior al 50%.
- La fracción que pase por el tamiz N° 40 debe tener un límite líquido de no más del 25% y un índice de plasticidad no mayor de 6%.
- El valor soporte de California C.B.R. no deberá ser inferior a 80%.
- La fracción que pase por el tamiz N° 200, no deberá ser mayor que dos tercios de la que pase por el tamiz N° 40.
- El equivalente de arena debe ser 40% como mínimo.

2.4.2.2 Funciones de la capa base

La base está constituida por materiales de mejor calidad que los de la subbase. La función de la base es:

- Tener la resistencia estructural para soportar las presiones transmitidas por los vehículos.
- Tener el espesor suficiente para que pueda resistir las presiones transmitidas a la subbase.
- Aunque exista humedad la base no debe de presentar cambios volumétricos perjudiciales.
- Reducir las tensiones verticales que las cargas por eje ejercen sobre las capas subbase y suelo natural.

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

2.4.3 Sub-base

Es la capa de material seleccionado que se coloca por encima de la subrasante y debajo de la base. El material seleccionado puede ser arena, grava, residuos de material de cantera y en algunos casos es posible usar el material de la subrasante mezclado con cemento. Esta capa tiene como finalidad transmitir los esfuerzos producidos por las cargas de tránsito originados en la carpeta asfáltica hasta la subrasante. La sub-base también tiene como función servir de capa de drenaje del agua que se infiltra a través de las capas superiores, el de impedir la ascensión capilar, el de controlar o eliminar en lo posible los cambios de volúmenes asociados a la humedad presente en la subrasante, impidiendo que se refleje en la superficie del pavimento.

2.4.3.1 Función de la capa subbase

La subbase es la capa de material que se construye sobre la terracería y su función es:

- Reducir el costo de pavimento disminuyendo el espesor de la base.
- Proteger a la base aislándola de la terracería.
- Prevenir la intrusión de los suelos de fundación de gradación fina, dentro de la capa base.
- Minimizar los efectos dañinos de la acción de las heladas.
- Proteger a la base impidiendo que el agua suba por capilaridad.
- Transmitir y distribuir las cargas a las terracerías.

- Proporcionar una plataforma de trabajo para el equipo de construcción importante cuando el suelo de fundación no puede proporcionar el soporte adecuado.

2.4.4 Subrasante

La subrasante, se define como la parte de la corteza terrestre, que le va a servir de soporte a la estructura del pavimento; puede ser subrasante natural (en el caso de los cortes), o constituirse en el sitio (artificial, para los terraplenes) (Benavides Bastidas, 2006).

Llamado también “terreno de fundación”, es aquel que sirve de apoyo o fundación del pavimento después de haber realizado acciones de corte y relleno para su posterior compactación con una óptima humedad. Una vez compactada debe garantizar que tendrá la resistencia apropiada ya que recibirá todas las cargas de tránsito, tendrá las secciones transversales y pendientes según lo especificado en los planos de diseño.

La capacidad de la subrasante es de gran importancia ya que el espesor que debe tener el pavimento, sea flexible o rígido, depende en gran parte de ella. En los casos de tener una subrasante pésima, es necesario sustituir el material del suelo por uno de mejor calidad o estabilizar con cemento, cal o algún otro aglomerante; si el terreno de fundación es malo habrá que colocar una capa de sub-base granular antes de colocar la capa de base; si la subrasante es regular solo basta con construir una capa de base y por último al tener una subrasante excelente en la que no habrá saturación de agua podría prescindirse de la base y sub-base y bastaría con colocar encima la carpeta asfáltica. (Timaná, 2012).

De lo mencionado anteriormente se puede decir que la subrasante tiene propiedades físicas (granulometría, clasificación de los suelos y relación humedad-densidad) que se relacionan con el tipo de material a utilizar y propiedades netamente ingenieriles (módulo resiliente, módulo de Poisson, CBR y módulo de reacción de la subrasante) que ofrecen una estimación de la calidad de los materiales usados en la subrasante. Finalmente, el

análisis de ambas propiedades ayuda a construir una subrasante compactada adecuadamente, lo que garantiza que el pavimento a construir descansará sobre un terreno de resistencia apropiada y no sufrirá ningún daño.

Actualmente las propiedades ingenieriles se encuentran correlacionadas con las propiedades físicas, esto quiere decir que al tener un material con buenas propiedades ingenieriles cumplirá con el tipo de material a utilizar en la subrasante. Con esto se concluye que basta tener una buena valoración de las propiedades ingenieriles para garantizar una buena subrasante; existen algunos ensayos para obtener un valor de estimación de las propiedades ingenieriles siendo el valor de soporte (CBR) el más importante y utilizado.

La capacidad de soporte de la subrasante, es la capacidad que tiene el suelo de soportar los esfuerzos verticales transmitidos por las cargas de tránsito. La deformación del suelo las deflexiones resultantes deberán ser menores a las admisibles.

Para que la estructura de pavimento se comporte adecuadamente y cumpla el período de diseño, presentará una deflexión máxima de 0.20 mm. para cargas estáticas transmitidas por un eje estándar de 8.2 ton. La deflexión máxima, bajo cargas estáticas, puede ser medida con la viga Benkelman, esto significa que al nivel de subrasante la deflexión máxima será de 0.5 a 1 mm.

Los reglamentos estatales en EE.UU. recomiendan que el valor CBR de la subrasante debe ser como mínimo entre 8 y 10%. Caso contrario, se deberá primero estabilizar el terreno antes de construir la estructura del pavimento. (Minaya & Ordóñez, 2006).

2.4.5 Funciones del suelo de fundación o subrasante

Las principales funciones de la capa subrasante son:

- Recibir y resistir las cargas del tránsito que le son transmitidas por el pavimento.
- Transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén.

Estas dos funciones son estructurales y comunes a todas las capas de las secciones transversales de una vía terrestre.

- Evitar que los materiales finos plásticos que formen el cuerpo del terraplén contaminen el pavimento. El tamaño de las partículas debe estar entre las finas correspondientes al cuerpo del terraplén y las granulares del pavimento.
- Evitar que las terracerías, cuando estén formadas principalmente por fragmentos de roca, absorban el pavimento. En este caso la granulometría del material debe ser intermedia entre los fragmentos de roca del cuerpo del terraplén y los granulares del pavimento (base y subbase).
- Evitar que las imperfecciones de la cama de los cortes se reflejen en la superficie de rodamiento.
- Uniformar los espesores de pavimento, sobre todo cuando varían mucho los materiales de terracería a lo largo del camino.
- Economizar espesores de pavimento, en especial cuando los materiales de las terracerías requieren un espesor grande.

La parte superior de la capa subrasante coincide con la subrasante o línea subrasante del proyecto geométrico, la cual debe cumplir con las especificaciones de pendiente longitudinal para la obra. Esta línea marca la altura de las terracerías y por lo tanto su espesor, que la mayoría de las veces es mayor que el necesario en la estructura.

En el proyecto geométrico de la subrasante económica es preciso tomar en cuenta:

- Las especificaciones de la pendiente longitudinal de la obra.
- Que la subrasante tenga la altura suficiente, a fin que el agua capilar no afecte el pavimento.
- Que la subrasante provoque los acarrees más económicos posibles.

2.5 CARACTERÍSTICAS DE LA SUBRASANTE

El comportamiento de una subrasante generalmente depende de tres características básicas, las cuales se hallan interrelacionadas entre sí, siendo éstas las siguientes:

2.5.1 La capacidad portante

La subrasante debe tener la capacidad de soportar las cargas transmitidas por la estructura del pavimento. La capacidad de carga es función del tipo de suelo, del grado de compactación y de su contenido de humedad.

El propósito del pavimento es proporcionar una superficie confortable al tránsito de vehículos. Consecuentemente, es necesario que la subrasante sea capaz de soportar un número grande de repeticiones de carga sin presentar deformaciones.

2.5.2 Contenido de humedad

El diferente grado de humedad de la subrasante afecta en forma determinante su capacidad de carga, pudiendo además llegar a provocar inclusive contracciones y/o expansiones indeseables, especialmente en el caso de la presencia de suelos finos.

El contenido de humedad es afectado principalmente por las condiciones de drenaje, elevación del nivel freático, infiltración etc. Una subrasante con un elevado contenido de humedad sufrirá deformaciones prematuras ante el paso de las cargas de sollicitación de los vehículos.

2.5.3 Contracción y/o expansión

Algunos suelos se contraen o se expanden, dependiendo de su grado de plasticidad y su contenido de humedad. Cualquier pavimento construido sobre estos suelos, si no se adoptan las medidas pertinentes, tenderán a deformarse y/o deteriorarse prematuramente.

Para evitar que las deflexiones admisibles en la subrasante excedan los límites establecidos, debe cumplirse que la presión transmitida por la carga se mantenga por debajo del valor de la carga máxima transmitida al suelo, para lo cual deberá tomarse en cuenta el tránsito de diseño a través del número de repeticiones de carga, las deflexiones máximas esperadas y el CBR del material con el que se ejecutará el mejoramiento.

2.6 SOLICITACIONES PRINCIPALES DE UN PAVIMENTO

Las solicitaciones principales de un pavimento son el producto del tránsito y el clima. El tránsito visto como las cargas a las que está expuesto el pavimento y el clima como el agente natural del medio ambiente.

2.6.1 Tránsito

Se puede apreciar que el volumen de vehículos ha crecido en los últimos años, pero ese aumento ha sido aún mayor si se ve en términos de la carga que se transporta, esta situación tiene una influencia significativa en el comportamiento de los pavimentos, a la hora de determinar o predecir el daño que sufrirá un pavimento en el tiempo. El tránsito está compuesto por diferentes vehículos, de diferentes pesos y número de ejes. Evaluar esta diversidad es un trabajo complejo, por tal razón, actualmente algunas metodologías definen la conversión del tránsito existente, proyectado o inducido en un número de ejes equivalentes identificado el cual consiste en el número de repeticiones de carga equivalentes a 8,2 ton. durante la vida útil del pavimento.

2.6.2 Clima

Las condiciones del medio ambiente tienen efectos sobre el comportamiento de los pavimentos rígidos y flexibles. Factores externos tales como la precipitación, temperatura y la profundidad del nivel freático juegan un papel clave para definir las limitaciones que los impactos del medio ambiente pueden tener en el comportamiento del pavimento. Factores internos tales como la susceptibilidad de los materiales de pavimentos para la humedad, drenabilidad en las capas de pavimento, infiltración potencial.

En la estructura de pavimento, la humedad y la temperatura son dos de las variables que pueden significativamente afectar la capa de pavimento y las propiedades de la subrasante, y, por lo tanto, su capacidad de soportar cargas.

2.6.3 Efectos de la temperatura

Los cambios en la temperatura del medio ambiente originan variaciones en la temperatura de las estructuras de los pavimentos.

En pavimentos rígidos, como resultado del cambio de temperatura, se obtiene una desigual dilatación o contracción de las fibras paralelas a la superficie con la profundidad, lo que provoca el alabeo de la losa. Este movimiento está parcialmente impedido por el peso propio y reacciones en los dispositivos de transmisión de cargas entre losas, lo cual provoca tensiones; el alabeo altera el régimen de contacto de la losa con la sub-base, aumentando las tensiones producidas por el tránsito. En pavimentos flexibles la temperatura producirá envejecimiento superficial de la capa de rodadura; además de ablandamiento y reducción de la viscosidad del asfalto y en presencia de bajas temperaturas se producirá pérdida de flexibilidad y grietas de contracción en el asfalto.

2.6.4 Efectos de la lluvia

El contenido de humedad, provoca una considerable influencia sobre las propiedades de los materiales que constituyen la estructura de pavimentos y sobre su comportamiento. Si la base, subbase y subrasante no están bien protegidas de la acción del agua se ocasionan daños, algunos de ellos son:

- Pérdida de partículas de suelo, creando erosión.
- Saturación y exceso de supresión o de fuerzas de filtración
- Pérdida de resistencia de la subrasante cuando esta se satura y permanece saturada durante un periodo largo de tiempo. Degradación de la calidad del material del pavimento por acción de la humedad.

2.7 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL CBR

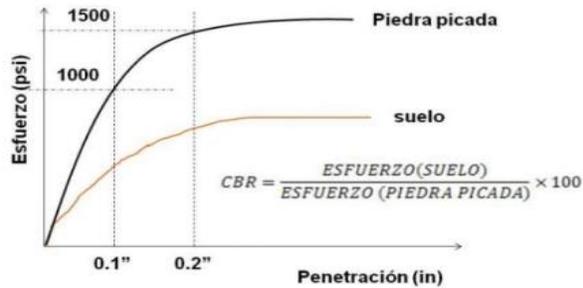
El CBR es un ensayo para evaluar la calidad de un material de suelo con base a su resistencia, medida a través de un ensayo de placa a escala.

CBR significa en español “Relación de soporte California, por las siglas en inglés de “California Bearing Ratio”, aunque en algunos países se conoce también este ensayo como Valor Relativo del Soporte (VRS).

La finalidad de este ensayo CBR, es determinar la capacidad de soporte de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables. El ensayo mide la resistencia al esfuerzo cortante (punzonamiento) de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, permitiendo obtener un % de relación de soporte. El ensayo CBR es el ensayo más utilizado, el cual representa la relación, en porcentaje, entre el esfuerzo requerido para penetrar un pistón a cierta profundidad dentro del suelo ensayado y el esfuerzo requerido

para penetrar un pistón igual a la misma profundidad, dentro de una muestra patrón de piedra triturada

Figura 6: Definición del Ensayo CBR



Fuente: Montejo Fonseca,2001

Para cada muestra preparada se debe dibujar una gráfica relacionando esfuerzo vs penetración del pistón y se determina el valor de CBR para diferentes penetraciones.

Los valores de índice de CBR oscilan entre 0 y 100. Los valores cercanos al 0% representan suelos de pobre calidad, mientras que los más cercanos a 100% mejor es la capacidad portante del suelo. Valores por debajo de 6, deben descartarse.

Tabla 2: Clasificación y usos del suelo de acuerdo a los valores CBR

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2 - 5	Muy mala	Subrasante
5 - 8	Mala	Subrasante
8 - 20	Regular - buena	Subrasante
20 - 30	Excelente	Subrasante
30 - 60	Buena	Subbase
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

Fuente: Assis A.1988

2.8 DEFLEXIÓN EN PAVIMENTOS

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

Dependiendo de la estructura de pavimento considerada, la sub-rasante contribuye entre un 70 a 95% de la deflexión medida en la superficie del pavimento. Por esta razón se puede afirmar que la mayor deflexión en los pavimentos es causada por la compresión elástica de la subrasante.

Este es un aspecto determinante en el desarrollo de distintas metodologías para caracterizar las propiedades elásticas de los suelos de la fundación del pavimento en base a la medición de deflexiones.

Entre las principales propiedades elásticas de la sub-rasante se encuentra el módulo resiliente (M_R), el cual corresponde al principal parámetro a determinar por diferentes modelos de cálculo.

Por otra parte, se debe considerar que la magnitud de la deformación en un material considerado en cualquier punto de la estructura de pavimento está directamente relacionada con el estado triaxial de esfuerzos, por lo que para las mismas condiciones cuando decrecen los esfuerzos verticales en la sub-rasante, la deflexión también decrece. Esto significa que al incrementar los espesores de las capas o incrementar su rigidez, la deflexión decrece.

Considerando los aspectos discutidos, la medición de deflexiones superficiales del pavimento corresponde a uno de los principales parámetros a determinar en cualquier evaluación estructural de un pavimento

2.9 MEDICIÓN DE DEFLEXIONES (VIGA BENKELMAN)

Un “ensayo de deflexión” es básicamente un “ensayo de carga”, que consiste en medir la respuesta de la estructura del pavimento (deformación elástica) ante la aplicación de un esfuerzo en la superficie. La carga que produce el esfuerzo deformador es proporcionada por la rueda doble de un camión, con un peso aproximado de 4000 kg (9000 libras). El sistema de pavimento-suelo de sub-rasante se deforma adoptando una forma curvada denominada “curva de deflexión” cuyo componente máximo se denomina deflexión máxima. La longitud de una deflexión se mide en unidades de “centésimas de milímetro”, utilizando cualquier tipo de deflectómetro, uno de los cuales es la denominada “Viga Benkelman”, llamada así en honor a su inventor Ing. Daniel Benkelman, del departamento de carreteras del estado de California (USA), quién la desarrollo en 1953 como parte del programa de ensayos viales de la ASSHO Road Test. Desde entonces su uso se ha difundido ampliamente en proyectos de evaluación estructural de pavimentos flexibles, tanto por su practicidad como por la naturaleza directa y objetiva de los resultados que proporciona.

2.10 ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS

2.9.1 Pruebas no destructivas

Es muy difícil efectuar una evaluación de la capacidad estructural de los elementos constituyentes de un pavimento, sin alterarlos, o destruirlos, de esta manera, las mediciones se realizan en la superficie del pavimento y los resultados se relacionan a las propiedades estructurales de los materiales de las capas interiores.

Generalmente se mide la respuesta de la estructura del pavimento a la aplicación de una fuerza o energía externa, y puesto que no se altera la estructura del pavimento, las pruebas pueden repetirse varias veces en el mismo sitio.

Se clasifican las pruebas de este tipo en tres categorías principales:

- Mediciones de respuesta bajo cargas estáticas o móviles, aplicadas a baja velocidad.
- Mediciones de respuesta a la aplicación de cargas repetidas.
- Mediciones de respuestas de una masa a una fuente de energía nuclear. La respuesta a la aplicación de una carga sencilla en la superficie del pavimento es medida por un dispositivo denominado viga Benkelman, medidor portátil desarrollado en el tramo de prueba AASHTO, que determina deflexiones de milésimas de pulgada.

Los resultados de un estudio efectuado en California indican que cuando las deflexiones de la superficie de un pavimento flexible exceden de un cierto valor, ese pavimento generalmente muestra signos de deterioro. La comparación de las deflexiones medidas con un valor de deflexión crítica proporciona un medio de programar el mantenimiento de los pavimentos flexibles.

Por otra parte, los estudios realizados en el tramo de prueba AASHTO indicaron que en el caso de pavimentos flexibles existe una relación entre las deflexiones producidas y su comportamiento, por lo que este método puede utilizarse como un medio de evaluar el comportamiento de un pavimento. Puede señalarse que la viga Benkelman es un instrumento sencillo de operar, pero existen variables como la temperatura del pavimento y el radio de curvatura de la deflexión producida, que requieren ser tomadas muy en cuenta en la interpretación de los resultados. Instalando dispositivos especiales dentro de la estructura del pavimento ha sido posible medir las deflexiones producidas al paso de cargas repetidas en movimiento. Los citados dispositivos deben instalarse permanentemente en el pavimento, no estando aun aclarada la influencia, en los resultados obtenidos de un dispositivo que es diferente al medio que lo rodea.

En el tramo de prueba AASHTO se realizaron mediciones de vibraciones producidas a pavimentos flexibles, al aplicar en la superficie una fuerza vertical alternante y midiendo posteriormente las deflexiones y la velocidad de proyección de las ondas. Las primeras proporcionan un valor de la rigidez elástica de la estructura total del pavimento, en tanto que la segunda puede proporcionar idea de la rigidez de las varias capas que lo integran. El cuerpo de Ingenieros de E.U.A ha empleado un equipo vibratorio para determinar el módulo de elasticidad del suelo bajo un pavimento siguiendo el método desarrollado por la compañía Soell de Países Bajos. A partir del valor del módulo obtenido y aplicando la teoría de la elasticidad puede determinarse la resistencia del pavimento.

El equipo empleado es de tipo móvil y el tiempo requerido para la ejecución de las pruebas es bastante corto, lo que constituyen factores favorables para su aplicación. Este equipo conocido comercialmente como Dynaflect, que la SAPO está empleando para estudio de evaluación del pavimento.

El Dynaflect es un sistema electromecánico que mide la deflexión dinámica de la superficie cuando se le aplica una carga oscilatoria (senoidal). El aparato medidor, cuyas complicaciones de detalle exceden el dominio de esta obra, viaja en un remolque arrastrado por un vehículo en el que se disponen los controles de la medición.

Una ventaja importante del aparato es no requerir ningún punto de referencia fijo en la superficie en que se realizan las mediciones y otra es la operación automática, libre de errores de operación y susceptibles de ser realizada a una velocidad relativamente alta.

La evaluación final de la capacidad estructural deberá tener en consideración los resultados obtenidos con el uso de los dos criterios, deflexión y resistencia, lo cual es, particularmente importante si se toma en cuenta que las correlaciones existentes entre

las medidas de deflexión, espesor y calidad de los pavimentos, así como el tránsito que circula por ellos, han sido obtenidos por diversas agencias bajo sus propias condiciones locales y, por lo tanto fundamentar la evaluación solo en dichas correlaciones podría resultar poco fiel a las condiciones particulares del problema que se estuviese tratando. El método de las deflexiones maneja el valor total de ellas en cada punto, pero no su distribución en profundidad, que es la característica realmente importante y en esto radica, su mayor limitación.

Por lo que se refiere al equipo a utilizar para la medición de las deflexiones, la selección ha de estar basada en su disponibilidad, costo y necesidades de avance; el costo de una viga Benkelman es considerablemente menor que el de un deflectógrafo dinámico tipo Dynaflect, pero la rapidez y eficiencia la determinación de las lecturas de deflexión que pueda lograrse con este último equipo es mucho mayor que cuando se utiliza una viga Benkelman.

2.11 ESQUEMA Y OPERACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN

El deflectómetro Benkelman funciona según el principio de la palanca. Es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple. Según se esquematiza en la figura 7, la viga consta esencialmente de dos partes:

- Un cuerpo de sostén que se sitúa directamente sobre el terreno mediante tres apoyos (dos delanteros fijos "A" y uno trasero regulable "B")
- Un brazo móvil acoplado al cuerpo fijo mediante una articulación de giro o pivote "C", uno de cuyos extremos apoya sobre el terreno (punto "D")
- El otro se encuentra en contacto sensible con el vástago de un extensómetro de movimiento vertical (punto "E").

Adicionalmente el equipo posee un vibrador incorporado que, al ser accionado, durante la realización de los ensayos, evita que el indicador del dial se trabe y/o que cualquier interferencia exterior afecte las lecturas, como se verá más adelante.

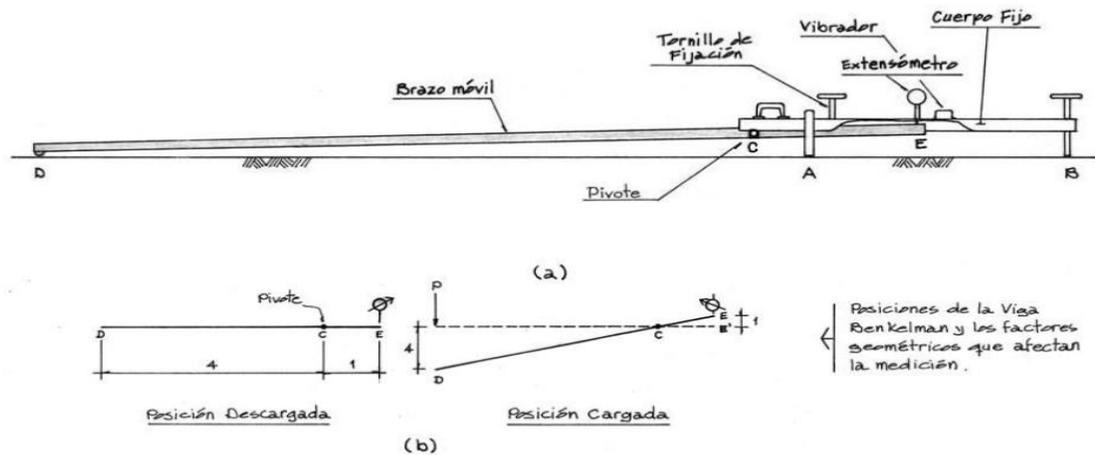
El extremo "D" o "punta de la viga" es de espesor tal que puede ser colocado entre una de las llantas dobles del eje trasero de un camión cargado. Por el peso aplicado se produce una deformación del pavimento, consecuencia de lo cual la punta baja una cierta cantidad, con respecto al nivel descargado de la superficie.

Como efecto de dicha acción el brazo DE gira en torno al punto fijo "C", con respecto al cuerpo AB, determinando que el extremo "E" produzca un movimiento vertical en el vástago del extensómetro apoyado en él, generando así una lectura en el dial indicador. Si se retiran luego las llantas cargadas, el punto "D" se recupera en lo que a deformación elástica se refiere y por el mismo mecanismo anterior se genera otra lectura en el dial del extensómetro.

La operación expuesta representa el "principio de medición" con la viga Benkelman. Lo que se hace después son sólo cálculos en base a los datos recogidos. Así, con las dos lecturas obtenidas es posible determinar cuánto deflectó el pavimento en el lugar subyacente al punto "D" de la viga, durante el procedimiento descrito.

Es de anotar que en realidad lo que se mide es la recuperación del punto "D" al remover la carga (rebote elástico) y no la deformación al colocar ésta. Para calcular la deflexión deberá considerarse la geometría de la viga, toda vez que los valores dados por el extensómetro (EE') no están en escala real, sino que dependen de la relación de brazos existentes

Figura 7: Esquema y principio de operación de la regla Benkelman



Fuente: civilgweek.com

Desarrollada en el Road Test de la AASHO en 1952. Consiste en un dispositivo sencillo que opera por medio de una palanca suspendida de un bastidor que transmite la deflexión vertical del punto de medida a un comparador.

Este equipo debe ser usado con un camión cargado normalmente con 80 KN en un eje, con llantas duales infladas a una presión de 0,48 a 0,55 Mpa (70 a 80 Psi). Las mediciones se realizan colocando la punta de la viga entre las dos ruedas y midiendo la deflexión cuando el vehículo se retira.

Los resultados de las deflexiones se leen en un dial indicador. Generalmente, la punta de la viga se coloca a 1,20m adelante del par de ruedas, se toma una lectura inicial y al retirar el camión, se toma la lectura máxima y una final del parámetro. Este equipo de bajo costo de utilización posee dos desventajas principales: la primera el bajo rendimiento de muestreo y segundo la falta de proveer un cuenco de deflexiones.

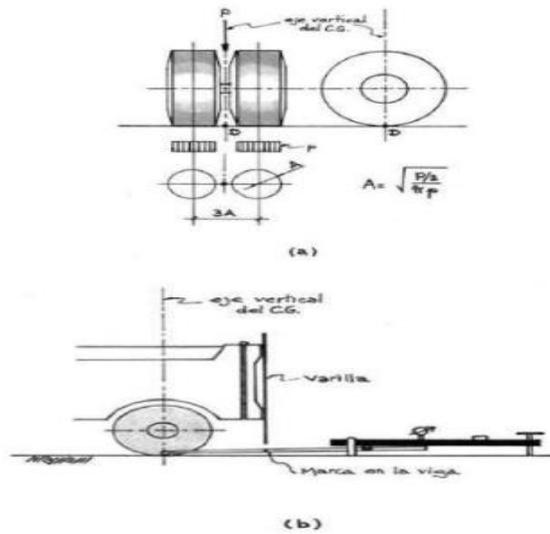
2.12 PROCEDIMIENTO EN EL CAMPO

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada en 9000 libras (4090 kg), y es proporcionada por una de las llantas dobles del eje trasero de un camión. 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.

Para esta operación es aceptable una tolerancia en el rango de 3 pulgadas alrededor del punto. Estacionados los neumáticos se inserta entre ellos el extremo del brazo móvil de la viga colocándolo nuevamente sobre el punto de ensayo seleccionado. Dado que este último se dificulta por la inaccesibilidad tanto visual como manual, se realizará previamente la siguiente operación: Se coloca la viga en la posición como si estuviera entre las llantas, pero en la parte exterior de las mismas, haciendo coincidir, empleando una plomada, el extremo del brazo móvil con el eje vertical del centro de gravedad. Tomando como punto de referencia una varilla vertical adosada a la parte trasera del camión se efectúa una marca en la viga de manera tal que, en adelante, basta con hacerlas coincidir (la marca con la varilla vertical) para asegurarse que el extremo de la viga coincide con el centro de las llantas, en el momento de iniciar las mediciones.

Figura 8: Configuración geométrica del sistema de carga



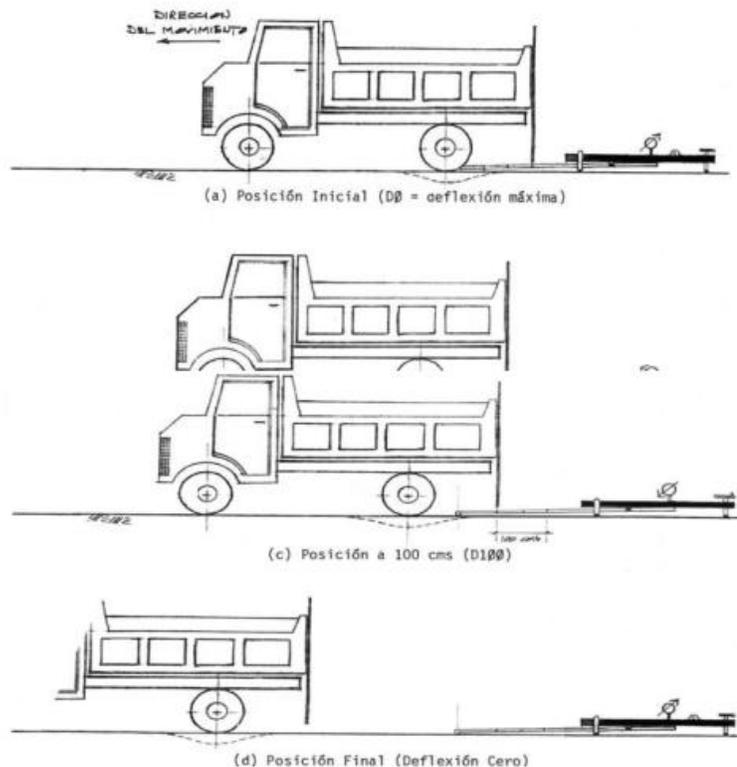
Fuente: Apuntes en digital de la materia de Carreteras III – Fac. Ciencias y Tecnología, “UAJMS”, Tarija-Bolivia

De igual forma se puede efectuar a partir de la primera, sucesivas marcas a distancias elegidas a las cuales se desee medir deflexiones adicionales (puede ser a 30, 40 y 50 cm). 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, o si es que se desea tener una idea grafica del tipo de curvas de deflexiones que se producen

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 (obtenida en la marca inicial). La segunda marca adicional se realiza al doble de la distancia de la primera marca adicional. Estas dos distancias se determinarán específicamente para cada Proyecto de evaluación que se emprenda. Esto deberán hacerse de por medio de tanteos previos, antes de comenzar la recolección masiva de datos. Es común que se observen variaciones durante la realización de los ensayos, pero no deberá hacerse modificaciones mientras que

las deflexiones tomadas en la primera marca adicional estén en el rango entre 35% y 65% de la deflexión máxima.

Figura 9: Esquema del proceso de medición

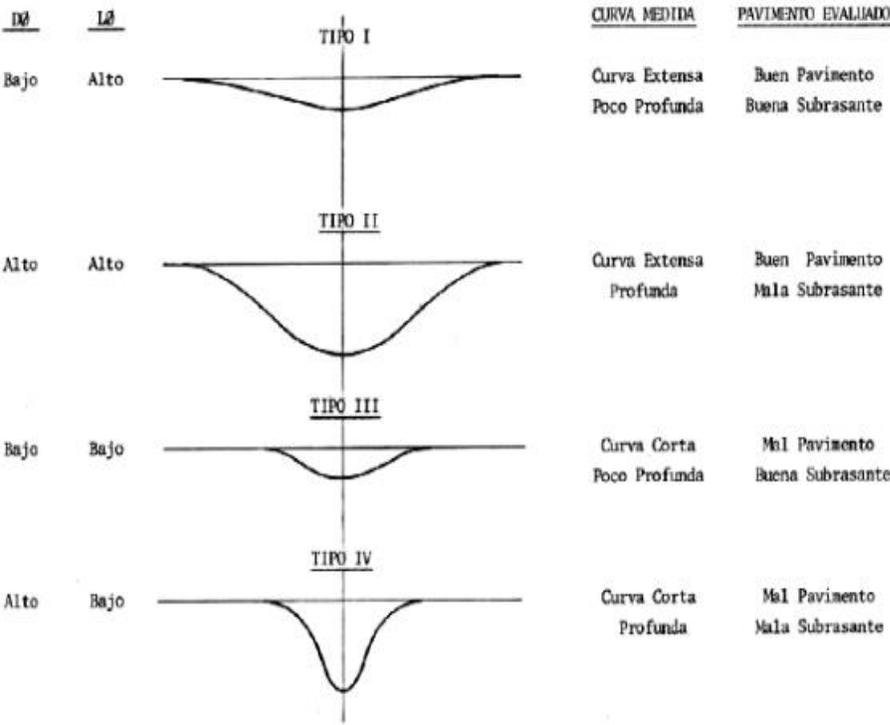


Fuente: Apuntes en digital de la materia de Carreteras III – Fac. Ciencias y Tecnología, “UAJMS”, Tarija-Bolivia

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 subrasante, los cuales se pueden utilizar para establecer relaciones cualitativas entre las características de la curva de deflexiones y el sistema pavimento-subrasante

Figura 10: Valores característicos de deflexiones en pavimento



Fuente:(Montejo Fonseca,2001)

2.13 CÁLCULO DEL CBR MEDIANTE EL ANÁLISIS DE DEFLEXIONES

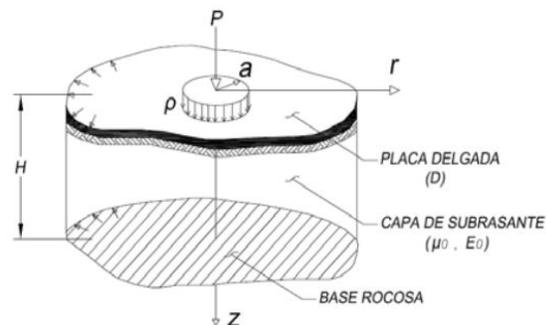
2.13.1 Modelo de Hogg

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 subrasante del pavimento. (Hogg, 1944).

Antes de dar la solución que plantea Hogg se debe tener en cuenta los parámetros del modelo y las siguientes suposiciones

- 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 11: Modelo Hogg



Fuente:(Hogg, 1944)

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 elasticidad de la subrasante ($\frac{kg}{cm^2}$)
	μ_0	Módulo de Poisson de la subrasante (adimensional)
	H	Profundidad del estrato rocoso (cm)
Parámetros de Evaluación	L_0, E_{sg}, D	Se obtienen conociendo dos valores de deflexiones medidas

Fuente: (Hoffman, 1977)

El modelo de Hogg permite caracterizar los materiales que conforman el sistema pavimento-subrasante, 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 subrasante 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.

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 (deflexión máxima E_0 y del denominado “factor de longitud de curva”) 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 módulo de resiliencia o del valor del CBR del substrato.

El trabajo 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.

Este método que se presenta permitirá la completa aplicación del análisis deformacional en 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. 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.

2.13.2 Correlaciones empíricas

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 subrasante, 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.

La ecuación de correlación fue obtenida mediante el análisis de 2135 pares de datos ($D_0 \times R_{50}, E_0$), en donde $D_0 \times R_{50}$ varía entre 324 y $6778 \times 10^{-1} \text{cm} \times \text{cm}$, y E_0 varía entre 2605236 kg/cm^2 .

2.13.3 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:

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

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 difundido 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.

Un método para calcular el módulo elástico del suelo de subrasante, en un punto ubicado directamente bajo una carga superficial impuesta, es el modelo de Hogg. El modelo de Hogg está basado en un sistema hipotético de dos capas que consiste en una placa relativamente delgada que se apoya sobre una fundación elástica. El método es práctico y simplifica el sistema elástico multicapa típico por un modelo equivalente bicapa, compuesto por una capa rígida sobre un medio elástico. Dependiendo de la selección de valores a lo largo de la curva de deflexión usada para calcular el módulo de la subrasante, existirá la posibilidad de sobre o subestimar el módulo de elasticidad.

El procedimiento con el modelo de Hogg usa la deflexión en el centro de la carga y una de las deflexiones adicionales fuera del punto inicial de aplicación de carga. Hogg mostró que la distancia radial donde la deflexión es aproximadamente la mitad de la deflexión bajo el punto inicial de carga, era eficaz para eliminar la tendencia de valoración o error estadístico de los parámetros. Sus cálculos consideran variaciones en el espesor del pavimento y la relación entre la rigidez de pavimento y la rigidez de la subrasante, ya que la distancia en donde la deflexión es la mitad de la desviación máxima está controlada por estos factores.

El desarrollo del modelo para carga puntual y una subrasante de espesor finito fue publicado en 1944 (1). Las soluciones numéricas y adaptación del modelo para cargas distribuidas, fue publicada en 1977 (2). Las ecuaciones que se emplean para el cálculo son:

Ecuación 1: Módulo de la subrasante según Hogg

$$E_0 = I \frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{2(1 - \mu_0)} \left[\frac{S_0}{S} \right] \left[\frac{p}{\Delta_0 l} \right]$$

Ecuación 2: Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión máxima

$$r_{50} = r \frac{(1/\alpha)^{1/\beta} - B}{\left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\Delta_0}{\Delta_r} - 1 \right) \right]^{1/\beta} - B}$$

Ecuación 3: Longitud característica de la curva de deflexión

$$l = y_0 \frac{r_{50}}{2} + [(y_0 r_{50})^2 - 4mar_{50}]^{1/2}$$

Si $a/l < 0,2$, entonces $l = (y_0 - 0,2m)r_{50}$

Ecuación 4: Relación entre la rigidez por carga puntual y carga distribuida

$$\left(\frac{S_0}{S} \right) = 1 - m \left(\frac{a}{l} - 0,2 \right)$$

Si $a/l < 0,2$, entonces $(S_0/S) = 1,0$

Donde:

E_0 = Módulo de elasticidad de la subrasante

μ_0 = Coeficiente de Poisson de la subrasante

S_0 = Rigidez Teórica por carga puntual

S = Rigidez del pavimento = $p / \Delta 0$ (carga distribuida)

p = Carga aplicada

$\Delta 0$ = Deflexión en el punto inicial de carga (Deflexión máxima)

Δr = Deflexión a la distancia radial r

r = Distancia radial del punto inicial de carga

r_{50} = Distancia radial para la cual $\Delta r / \Delta 0 = 0,5$

l = Longitud característica

h = Espesor de la subrasante

I = Factor de Influencia — ver Tabla 4

α = Coeficiente de ajuste de curva—ver Tabla 4

β = Coeficiente de ajuste de curva—ver Tabla 4

B = Coeficiente de ajuste de curva—ver Tabla 4

y_0 = Coeficiente para la longitud característica—ver Tabla 4

m = Coeficiente para la longitud característica—ver Tabla 4

\bar{m} = Coeficiente para la relación de rigideces—ver Tabla 4

Wiseman describió la implementación del modelo de Hogg señalando tres casos. Uno es para una fundación infinita elástica, y los otros dos casos son para un estrato finito elástico con un espesor efectivo que se asume aproximadamente igual a 10 veces la longitud característica. Los dos casos de espesor finito corresponden a coeficientes de Poisson fijados en 0,4 y 0,5, respectivamente. La Tabla 4 muestra los valores establecidos para las constantes usadas para los tres casos del modelo de Hogg.

Tabla 4: Coeficientes para el modelo Hogg

Ecuación	CASOS		I	II	III
	Profundidad de estrato rígido	h/l_0	10	10	Infinito
Coeficiente de Poisson	μ_0	0.50	0.40	Todos	
1	Factor de Influencia	l	0.1614	0.1689	0.1925
2	Valor de Δ_r/Δ_0		> 0.70	> 0.426	Todos
	$r_{50}=f(\Delta_r/\Delta_0)$	α	0.592	0.548	0.584
		β	2.460	2.629	3.115
		B	0	0	0
	Valor de Δ_r/Δ_0		< 0.70	< 0.426	
	$r_{50}=f(\Delta_r/\Delta_0)$	α	0.219	0.2004	
β		371.1	2283.4		
B		2	3		
3	$l=f(r_{50}, \alpha)$	y_0	0.620	0.602	0.525
		m	0.183	0.192	0.180
4	$S_0/S = f(a/l)$	\bar{m}	0.52	0.48	0.44

Fuente: Pablo del Águila Rodríguez

2.13.4 Método de análisis

Para facilitar el análisis de los numerosos datos de ensayos que se recopilan en un típico proyecto de evaluación estructural se han computarizado los procedimientos de interpretación.

A continuación, se presentan los diferentes pasos de interpretación con los respectivos algoritmos y ejemplos de su utilización.

Estos algoritmos pueden resolverse manualmente cuando no se dispone de una computadora. A pesar que la metodología presentada es para ensayos con la viga

Benkelman, ésta es adaptable a mediciones con otros aparatos o método de medición de deflexiones.

2.13.4.1 Modelo de carga

La carga en el ensayo con la viga Benkelman proviene del eje trasero simple con llanta doble de un camión. La carga del eje es del orden de 18,000 libras y la presión de inflado es de 75 a 85 psi. En el modelo de carga se asume que la presión de inflado es igual a la presión de contacto, que la huella de contacto de cada llanta es circular y de radio “A” y, que hay una distancia de “3A” entre los centros de cada llanta, por equilibrio se establece la siguiente relación:

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi p}}$$

Donde:

a = Radio de la huella circular de contacto

P = Carga sobre una llanta

p = Presión de inflado

2.13.4.2 Determinación del R₅₀

R₅₀ es la distancia “R” del centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal, en la cual se obtiene que la relación D_R/D₀ = 0,5 en la curva de deflexiones. Para el modelo de Hogg se ha establecido que R₅₀ puede determinarse usando la siguiente ecuación:

$$r_{50} = r \frac{(\beta)^a - B}{\left[\beta \left(\frac{\Delta_0}{\Delta r} - 1\right)\right]^\alpha - B}$$

Donde:

R = Distancia a la que se mide la deflexión DR

D₀ = Deflexión Máxima

D_R = Deflexión a la distancia R

α, β, B = Coeficientes de correlación cuyo valor se indica en la tabla 4

El valor R₅₀ sirve de insumo para determinar la longitud elástica (L₀) del pavimento según se explica a continuación.

2.13.4.3 Determinación de la longitud característica de la curva de flexión (L₀)

La longitud elástica (L₀) del pavimento puede calcularse usando la siguiente ecuación.

$$l = \frac{y_0 r_{50} + ((y_0 r_{50})^2 - 4mar_{50})^{1/2}}{2}$$

Si $a/l < 0,2$, entonces $l = (y_0 - 0,2m) r_{50}$

Donde:

R₅₀ = Distancia del centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal

a = Radio de la huella circular de carga

y_0, m = Coeficiente de correlación cuyo valor se indica en la tabla 4

El valor de L_0 sirve de insumo para determinar el módulo de elasticidad de la subrasante (E_0) según se explica a continuación.

2.13.4.4 Determinación del módulo de elasticidad de la subrasante (E_0)

La determinación del módulo de elasticidad de la sub rasante constituye un punto central de la metodología de evaluación. Para desarrollar soluciones numéricas programables en computadora, esta determinación se efectúa en dos pasos:

Primer paso: El primer paso consiste en establecer la relación teórica entre la rigidez para carga puntual y la rigidez para carga distribuida sobre un área, para un cociente dado del valor A/L_0 . La rigidez se define como el cociente entre la carga y la deflexión ($S = P/D_0$).

La relación teórica se calcula por medio de la ecuación:

$$\frac{S_0}{S} = 1 - m \left(\frac{a}{l} - 0,2 \right)$$

Donde:

Si $a/l < 0,2$, entonces $(S_0/S) = 1,0$

S_0 = Rigidez para carga puntual

S = Rigidez para carga de área

m = Coeficiente numérico que adopta los valores de la tabla 4

Segundo paso: Una vez determinado el valor de S_0/S , se calcula el módulo de elasticidad de la subrasante por medio de la siguiente ecuación:

$$E_0 = I \frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{2(1 - \mu_0)} \left[\frac{S_0}{S} \right] \left[\frac{p}{\Delta_0 l} \right]$$

Donde:

μ_0 = Coeficiente numérico que depende del coeficiente de Poisson de la subrasante

I = Coeficiente numérico

P = Carga total en la llanta doble

L_0 = Longitud elástica

D_0 = Deflexión máxima

2.13.5 Correlaciones entre módulo resiliente y CBR

Históricamente, la caracterización mecánica de los suelos con referencia al diseño estructural de los pavimentos, se ha efectuado a través del valor soporte relativo CBR.

Este valor, determinado a través de un ensayo de corte (punzonamiento) es de carácter empírico y no está vinculado a ninguna propiedad mecánica fundamental de los suelos y los materiales granulares.

Debido a la complejidad que tiene el ensayo de determinación de MR y a que no es fácil disponer del equipo, se crearon alternativas para incorporar de forma más fácil el MR a

los métodos de diseño estructural de pavimentos a través de correlaciones empíricas con el CBR.

A partir de 1962, Seed y otros introducen el concepto de Módulo resiliente (Mr), definiéndolo como la relación entre el tensor desviador dinámico aplicado y la componente de la deformación específica resiliente o recuperable, bajo un pulso dinámico de carga. El valor del Mr, así propuesto, fue rápidamente aceptado por la comunidad vial en función de las muchas evidencias obtenidas sobre este tipo de comportamiento “pseudo elástico” a través de mediciones de la deflexión recuperable del pavimento con equipos como la regla Benkelman y/o el deflectómetro Lacroix, el cálculo de los módulos de deformación mediante procedimientos de retro ajuste (backcalculation) y el comportamiento observado en pavimentos en servicio.

En la última década el valor del módulo resiliente ha sido reconocido como una forma adecuada de caracterizar los materiales no ligados. No obstante, aún requiere un mejor conocimiento sobre la forma más apropiada de llevar a cabo los ensayos de laboratorio, los modelos que representan esos resultados experimentales y la implementación de los mismos dentro de las rutinas de cálculo en los programas computacionales de dimensionamiento de pavimentos.

CAPÍTULO III

**APLICACIÓN PRÁCTICA SOBRE LA
CORRELACIÓN ENTRE LA
DEFLECTOMETRÍA Y LAS PROPIEDADES DE
LA SUBRASANTE.**

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA SOBRE LA CORRELACIÓN ENTRE LA DEFLECTOMETRÍA Y LAS PROPIEDADES DE LA SUBRASANTE

3.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DEL PROYECTO

La zona de estudio para la realización de este proyecto se encuentra en la ciudad de Tarija, provincia Cercado, ubicado en una zona de mucha circulación vehicular y peatonal, inicia desde el barrio El Tejar, pasando por el barrio San Gerónimo, Juan XXIII hasta parte del barrio Aeropuerto.

La zona de estudio se encuentra específicamente sobre la Av. Jaime Paz Zamora entre la calle España y Rafael Pabón, tiene una longitud aproximadamente de 1,20 km cada carril, haciendo un total de 4,80 km entre las tres vías, considerando que en el carril de doble circulación se realizó el ensayo en ambos carriles.

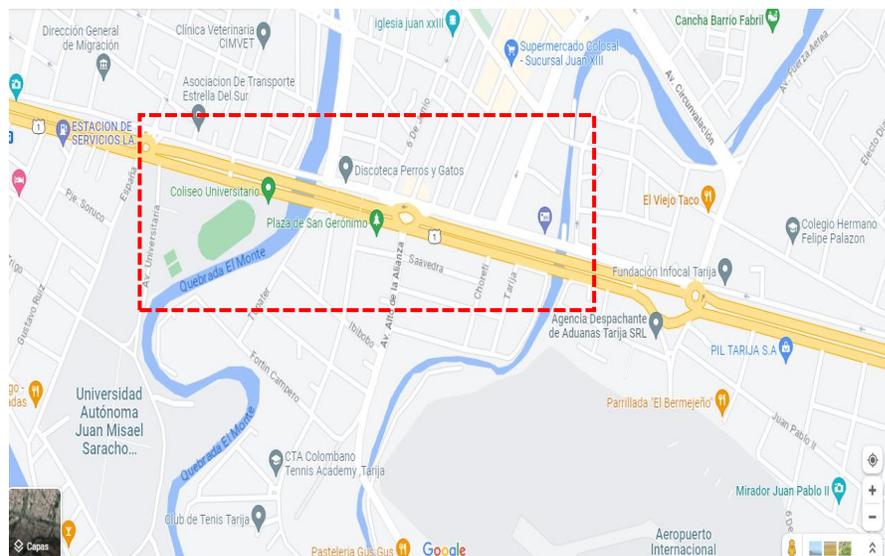
El tramo se divide en tres carriles que atraviesan principalmente por la Av. Jaime Paz Zamora, el primer carril de un solo sentido con dirección sur, se encuentra en las coordenadas $P_i(21^{\circ}32'31,39''S-64^{\circ}43'18,18''W)$ $P_f(21^{\circ}32'39,07''S-64^{\circ}42'37,86''W)$ tiene como calles aledañas y de referencia para la toma e identificación de datos, la avenida España, calle Lazcano, calle Gral. Sossa, pje. Suarez, Av. Los membrillos, calle Bat. Colorados, calle Villamontes, Av. Alto de la Alianza, calle Tarija, calle Gerardo Maldini.

El segundo carril de igual forma tiene como vía principal la Av. Jaime Paz Zamora, de un solo sentido de circulación con dirección norte se encuentra en las coordenadas $P_i(21^{\circ}32'38,31''S-64^{\circ}42'37,65''W)$ $P_f(21^{\circ}32'30,69''S-64^{\circ}43'18,12''W)$ y tiene como calles aledañas y de referencia, la calle Gerardo Maldini, calle Tarija, Av. Alto de la

Alianza, calle Villamontes, calle Bat. Colorados, Av. Los membrillos, pje. Suarez, calle Gral. Sossa, calle Lazcano, la avenida España.

El tercer carril de doble sentido de circulación se encuentra en las coordenadas Pi(21°32'37,56''S-64°42'37,37''W) Pf(21°32'29,72''S-64°43'18,21''W), el mismo tiene como calles referencia, la avenida España, calle Lazcano, calle Gral. Sossa, pje. Suarez, Av. Los membrillos, av. Julio Delio Echazú calle Godofredo Arnold, Av. Font, Av. Romero, calle Gerardo Maldini, calle cap. Rafael Pabón.

Figura 12: Área de estudio



Fuente: Google Maps

Figura 13: Imagen satelital del área de estudio



Fuente: Google Earth

3.2 CARACTERÍSTICA DEL ÁREA DEL PROYECTO

Se trata de una de las vías más transitadas de la ciudad, la cual ayuda al descongestionamiento vehicular, siendo una de las principales avenidas que conectan con las salidas del departamento; hacia el sur, primeramente, pasando por el aeropuerto Oriel Lea Plaza, llegando así a otras salidas departamentales e interprovinciales como ser la parada “El Chaco” y la Nueva Terminal de buses de Tarija.

La zona de estudio se encuentra en constante transitabilidad de vehículos pesados y livianos, considerando que en pasadas gestiones se encontraba en inmediaciones la terminal de buses, así también existe bastante flujo de peatones, que circulan de a pie, principalmente universitarios, docentes, administrativos de la universidad autónoma Juan Misael Saracho que utilizan esta avenida para su circulación.

Según historiadores locales comentaron que la finalidad de dicha Avenida fue formar parte de la ruta panamericana entre Potosí – Tarija – Padcaya – Bermejo para llegar hasta

Argentina, pero no se llegó a su cometido. La construcción original de esta avenida abarcó una longitud de 2,8 km, misma que demoró un año en su construcción para ser inaugurada en julio de 1951.

Es una avenida de tres vías, dos de un solo sentido de circulación y una de doble vía, conformada por una superficie de rodadura de 9 metros y con bermas de 1,00 metro de ancho. En la zona de estudio se cuenta con tres rotondas; la primera está ubicada en la calle España, la segunda rotonda se encuentra en el ingreso al barrio San Gerónimo y la última rotonda es la del aeropuerto, también cuenta con seis puentes; tres que se encuentran en la quebrada “El monte”, uno en cada vía y tres puentes que se encuentran en la quebrada “San Pedro”.

Es una avenida de suma importancia para el tránsito vehicular, cabe recalcar que debido a tan alta transitabilidad la capa de rodadura sufrió bastante daño superficial, lo cual provoca accidentes de tránsito de manera continua, caída de los peatones, etc. Por lo tanto, se requiere de un mantenimiento circunstancial para mejorar su capacidad de servicio; y de esta forma satisfacer la demanda de tráfico vehicular que está en continuo crecimiento. Y a su vez evitar accidentes de tránsito por el mal estado de la vía.

Figura 14: Carril derecho del tramo en estudio



Fuente: Elaboración propia

Figura 15: Carril del medio



Fuente: Elaboración propia

Figura 16: Doble vía



Fuente: Elaboración propia

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La medición de deflexiones se realizará a través de la viga Benkelman siguiendo un procedimiento de campo determinado.

El equipo mínimo requerido para la realización de ensayos de medición de deflexiones es el siguiente:

- a) Deflectómetro viga Benkelman de brazo simple rebatible, que guarde una relación punta-pivote y pivote- vástago dial igual a 1:1 (digital); deberá estar equipada con un sistema de vibración interna accionada con baterías y con un dial indicador diseñado especialmente para este tipo de ensayos, es decir, que sean capaces de dar las lecturas corregidas en forma interna, para la relación de brazos del equipo.

Figura 17: Viga Benkelman



Fuente: Elaboración propia

- b) Un camión para el ensayo con las siguientes características:
 - Carga del eje trasero simple de 18,000 libras, igualmente distribuidas en sus ruedas duales
 - La presión de inflado de las llantas deberá estar dentro del rango de 75 a 85 psi.

- Para la ejecución de los ensayos se empleará la carga estandarizada del eje trasero simple con llantas dobles de un camión tipo volqueta, con un peso de 8230 kg y 80 psi de inflado. El tamaño de las llantas del vehículo será 11,00-20 o 12,00-20 de 16 lonas. El peso del eje trasero se alcanzará colocando una carga fija de peso no variable en el tiempo, sobre la tolva de la volqueta.

Figura 18: Camión utilizado en el ensayo



Fuente: Elaboración propia

- c) un termómetro de 0 a 100 °C con divisiones cada grado

Figura 19: Operadores usando el termómetro



Fuente: Elaboración propia

- d) una cinta métrica

para la realización del ensayo, se deben tener las siguientes condiciones:

- la carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones debe ser de 9000 libras (4080 kg)
- la carga aplicada al pavimento será proporcionada por una de las llantas dobles del eje trasero de un camión
- debe tenerse en cuenta la presión de las llantas requerida
- localizar el lugar donde se realizará el ensayo (usualmente los puntos de medición se localizaron con la ayuda de progresivas marcadas)
- para la rutina del ensayo será necesario la participación de dos operadores: un operador que lea y anote las lecturas tanto del extensómetro como del termómetro y un ayudante que coordine con el conductor del camión

3.4 PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN

3.4.1. Ensayo de deflectometría.

1. Los controles deflectométricos se efectuaron sobre la superficie de la capa de rodadura, en el tramo “Av. Jaime Paz Zamora entre Av. España y calle Rafael Pabón” iniciando en el primer carril de dicha avenida sobre la av. España finalizando en la calle Rafael Pabón llegando a ser aproximadamente un kilómetro en cada vía.

Figura 22: Imagen satelital del área de inicio



Fuente: Google Earth

El ensayo se realizó en tres carriles de aproximadamente un kilómetro de longitud, donde obtendremos en total cuarenta puntos de análisis, distribuidos cada cien metros, haciendo un total de diez puntos por carril. En el carril de doble vía se realizó la medición tanto en el lado izquierdo como en el lado derecho.

Figura 23: Imagen satelital del área de estudio



Fuente: Google Earth

2. Primeramente, se debe colocar la viga Benkelman entre los neumáticos del eje trasero del camión, tomando como punto de referencia una varilla metálica adosada en la parte trasera del camión, la misma va a efectuar una marca en la viga para que en adelante solo sea necesario hacerlas coincidir (la marca con la varilla)

para asegurarse que el extremo de la viga coincide con el centro de las llantas, al momento de iniciar con las mediciones.

Figura 24: Instalación de la viga Benkelman



Fuente: Elaboración propia

Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la cadena vertical y la marca inicial, se verificará que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se procederá a realizar el ensayo de deflectometría, mientras el camión se desplaza muy lentamente, se tomará lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con la primera y segunda marcas adicionales y una lectura final cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo que el indicador dial ya no tenga movimiento (aproximadamente 5,00 m).

Figura 25: Viga Benkelman alineada



Fuente: Elaboración propia

Cada ensayo consistió en la ejecución de 6 lecturas, las que se efectuaron a 0, 50, 100, 150, 200 y 500 cm desfasadas del punto inicial de aplicación de carga.

Figura 26: Espaciamiento para lecturas



Fuente: Elaboración propia

Figura 27: Toma de lecturas



Fuente: Elaboración propia

Figura 28: Toma de lecturas



Fuente: Elaboración propia

3. Los resultados de la medición serán tabulados en una tabla de registro, obteniendo de esta manera datos de deflexión máxima y radio de curvatura los cuales serán analizados para determinar los parámetros de la subrasante del tramo en estudio a partir de ecuaciones de correlación con los resultados del ensayo y de esta manera obtener la capacidad portante del pavimento seleccionado.

3.5 RESULTADOS DE LA CORRELACIÓN

3.5.1 Cálculo de deflexiones

El procedimiento para el cálculo de las deflexiones es simple, para el caso de la deflexión máxima, se debe calcular la diferencia entre la lectura inicial y la lectura final. Para el caso de la deflexión a 50 cm se debe encontrar la diferencia entre la lectura a 50 cm y la lectura final, de igual manera encontrar la diferencia para 100 cm con la lectura final.

Para el entendimiento de este proceso se realizará un ejemplo tomando datos del primer carril de medición el cual se encuentra a inmediaciones de la Av. España, las lecturas tomadas son:

Primeramente, se ajusta el dial en 0 siendo esta la lectura inicial, luego se tomaron 5 lecturas más: 0,4 (a 50 cm), 0,5 (a 100 cm), 0,8 (a 150 cm), 0,8 (a 200 cm), y 1,0 (a 500 cm) siendo esta última la lectura final, pues se supone que las deformaciones producidas a partir de esta distancia (5m) es cero.

Realizando la resta de los datos obtenidos según lo especificado anteriormente se obtiene (1,00-0) 1,00, (1,00-0,4) 0,6 y así sucesivamente 0,5, 0,2, 0,2 y 0; ya que en nuestro laboratorio de asfaltos de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho” se cuenta con equipos sofisticados para distintos ensayos, se realizó el ensayo con una viga Benkelman digital, la cual tiene una relación punta-pivote y pivote-vástago dial igual a 1:1; lo que quiere decir que no es necesario realizar la multiplicación por 2, llegándose así a obtener lecturas reales.

3.5.2 Determinación del módulo resiliente mediante el método Hogg

3.5.2.1 Método de análisis

Para facilitar el análisis de los datos que se recopilaron con la viga Benkelman serán procesados de la mejor manera posible siguiendo los pasos ya mencionados en el anterior capítulo, a continuación, se presentan los diferentes pasos de interpretación mediante ejemplos para su mejor entendimiento.

3.5.2.2 Modelo de carga

La realización del ensayo de la viga Benkelman proviene del eje trasero simple con llanta doble de un camión, la carga del eje es del orden de los 8230 kg. (18144 lb), es decir 4536 lb por llanta y la presión de inflado está en 80 psi con estos datos podemos conocer el área de contacto mediante la siguiente ecuación:

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi p}}$$

Donde:

a = Radio de la huella circular de contacto

P = Carga sobre una llanta

p = Presión de inflado

$$a = \sqrt{\frac{4536}{\pi (80)}} = 4,25" = 10,8 \text{ cm.}$$

3.5.2.3 Determinación de R_{50}

R_{50} es la distancia "R" del centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal, en la cual se obtiene que la relación $D_R/D_0 = 0,5$ en la curva de deflexiones. Para el modelo de HOGG se ha establecido que R_{50} puede determinarse usando la siguiente ecuación:

$$r_{50} = r \frac{(\beta)^\alpha - B}{\left[\beta \left(\frac{\Delta_0}{\Delta r} - 1\right)\right]^\alpha - B}$$

Donde:

R = Distancia a la que se mide la deflexión DR

D_0 = Deflexión Máxima

D_R = Deflexión a la distancia R

α, β, B = Coeficientes de correlación cuyo valor se indica en la tabla 4

Para la determinación del R_{50} como ejemplo se tomó el primer tramo del carril derecho de la Av. Jaime Paz Zamora, donde se tuvo una deflexión máxima $D_0 = 1$ y a una distancia $R = 50$ cm una deflexión $D_R = 0,6$, una vez conocidos estos valores se calcula la relación $D_R/D_0 = 0,60$, ahora se debe ver que valores de coeficientes se van a utilizar según la tabla 4 para el caso II, se tiene la siguiente condición:

- Si $D_R/D_0 > 0,426$ entonces $\alpha = 0,548$, $\beta = 2,629$ y $B = 0$
- Si $D_R/D_0 < 0,426$ entonces $\alpha = 0,2004$, $\beta = 2283,4$ y $B = 3$

Una vez escogidos los coeficientes según la condición D_R/D_0 se usa la ecuación anterior:

$$r_{50} = 50 \frac{(2,629)^{0,548} - 0}{[2,629 \left(\frac{1,00}{0,60} - 1\right)]^{0,548} - 0}$$

$$\mathbf{R_{50} = 62,44 \text{ m}}$$

3.5.2.4 Determinación de la longitud elástica (L_0)

La longitud elástica (L_0) del pavimento puede calcularse usando la siguiente ecuación:

$$l = \frac{y_0 r_{50} + ((y_0 r_{50})^2 - 4 m a r_{50})^{1/2}}{2}$$

Si $a/l < 0,2$, entonces $l = (y_0 - 0,2m) r_{50}$

$R_{50} = 62,44$ Calculado en la ecuación anterior

$a = 10,8$ Radio de la huella circular de carga

$y_0 m =$ Coeficiente de correlación cuyo valor se indica en la tabla 4 donde $y_0 = 0,602$, $m = 0,192$

Sustituyendo los anteriores datos en la ecuación se obtiene:

$$l = \frac{0,602 * 62,44 + ((0,602 * 62,44)^2 - 4 * 0,192 * 10,8 * 62,44)^{1/2}}{2}$$

$$l = 33,75 \text{ m}$$

3.5.2.5 Determinación del módulo de elasticidad de la sub-rasante (E_0)

La determinación del módulo de elasticidad de la sub rasante constituye un punto central de la metodología de evaluación. Para desarrollar soluciones numéricas programables en computadora, esta determinación se efectúa en dos pasos:

Primer paso: El primer paso consiste en establecer la relación teórica entre la rigidez para carga puntual y la rigidez para carga distribuida sobre un área, para un cociente dado del valor A/L_0 . La rigidez se define como el cociente entre la carga y la deflexión ($S = P/D_0$).

La relación teórica se calcula por medio de la ecuación:

$$\frac{S_0}{S} = 1 - \bar{m} \left(\frac{a}{l} - 0,2 \right)$$

Si $a/l < 0,2$, entonces $l = (y_0 - 0,2m) r_{50}$

Donde:

S_0 = Rigidez para carga puntual

S = Rigidez para carga de área

$\bar{m} = 0,48$ Coeficiente numérico que adopta los valores de la tabla 4

Conociendo $a = 10,8$ y $l = 33,75$ se obtiene:

$$\frac{S_0}{S} = 1 - 0,48 \left(\frac{10,8}{33,75} - 0,2 \right)$$

$$\frac{S_0}{S} = 0,94$$

Segundo paso: Una vez determinado el valor de S_0/S , se calcula el módulo de elasticidad de la subrasante por medio de la siguiente ecuación:

$$E_0 = I \frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{2(1 - \mu_0)} \left[\frac{S_0}{S} \right] \left[\frac{P}{\Delta_0 I} \right]$$

Donde:

$\mu_0 = 0,4$ Coeficiente numérico que depende del coeficiente de Poisson de la subrasante

$I = 0,1689$ Coeficiente numérico

$P = 4115$ kg Carga total en la llanta doble

$L_0 = 33,75$ Longitud elástica

$D_0 = 1$ Deflexión máxima

$S_0/S = 0,94$ Relación teórica entre la rigidez por carga puntual y carga distribuida

Reemplazando los resultados de la ecuación anterior se obtiene:

$$E_0 = 0,1689 \frac{(1 + 0,4)(3 - 4 * 0,4)}{2(1 - 0,4)} [0,94] \left[\frac{4115}{1 * 33,75} \right] * 1000$$

$$E_0 = 31695,66 \text{ kg/cm}^2$$

3.5.2.6 Determinación del CBR

Para la aplicación del método en la práctica, bastará con medir con la viga Benkelman y empleando la carga de un eje estándar, la deflexión máxima (D_0) y una deflexión adicional (D_R), a una distancia radial (R), con los que se podrá calcular en forma rápida el módulo de elasticidad o el CBR del suelo de sub rasante.

Los CBR se calcularon con la siguiente ecuación:

$$E_0 = k * CBR$$

Donde:

E_0 = Módulo elástico o resiliente (kg/cm²)

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 (%)

$$\text{CBR} = \frac{31695,66}{110}$$

$$\text{CBR} = 3,00 \%$$

Con la tabla 2 obtenida de la teoría, se clasificó los valores de % de CBR obtenidos de las unidades de estudio de acuerdo al rango y calidad en el que se encuentra.

De las planillas de deflexiones determinaremos los módulos resilientes y en función de ellos, los porcentajes de CBR en cada segmento. Los resultados se mostrarán continuación.

En la sección anexos tablas de resultados se encuentra un resumen de la planilla de cálculos.

CARRIL DERECHO:

Tabla 5: CBR carril derecho

Eo para 50 (kg/cm ²)	CBR %	Condición
		Subrasante
31695,66	3,00	MUY MALA
32494,31	3,00	MUY MALA
27538,00	3,00	MUY MALA
48741,46	4,00	MUY MALA
45473,69	4,00	MUY MALA
48741,46	4,00	MUY MALA
45473,69	4,00	MUY MALA
27538,00	3,00	MUY MALA

$$\text{Promedio CBR} = \frac{K}{110} \text{ (Suelos granulares finos)}$$

$$\text{Promedio CBR} = 3,50 \%$$

Fuente: Elaboración propia

CARRIL MEDIO:

Tabla 6: CBR carril medio

Eo para 50 (kg/cm ²)	CBR %	CONDICIÓN
		Subrasante
27538,00	3,00	MUY MALA
27538,00	3,00	MUY MALA
45473,69	4,00	MUY MALA
27538,00	3,00	MUY MALA
45473,69	4,00	MUY MALA
27538,00	3,00	MUY MALA
48741,46	4,00	MUY MALA

Fuente: Elaboración propia

K= 110 (Suelos granulares finos)
Promedio
CBR= 3,43 %

CARRIL DERECHO (DOBLE VÍA)

Tabla 7: CBR carril derecho doble vía

Eo para 50 (kg/cm ²)	CBR %	CONDICIÓN
		Subrasante
45473,69	4,00	MUY MALA
27538,00	3,00	MUY MALA
45473,69	4,00	MUY MALA
45473,69	4,00	MUY MALA
27538,00	3,00	MUY MALA
45473,69	4,00	MUY MALA
48741,46	4,00	MUY MALA
45473,69	4,00	MUY MALA

Fuente: Elaboración propia

K= 110 (Suelos granulares finos)
Promedio
CBR= 3,75 %

CARRIL IZQUIERDO (DOBLE VÍA)

Tabla 8: CBR carril izquierdo

Eo para 50 (kg/cm ²)	CBR %	Condición
		Subrasante
27538,00	3,00	MUY MALA
48741,46	4,00	MUY MALA
45473,69	4,00	MUY MALA
48741,46	4,00	MUY MALA
27538,00	3,00	MUY MALA
45473,69	4,00	MUY MALA
27538,00	3,00	MUY MALA
45473,69	4,00	MUY MALA
27538,00	3,00	MUY MALA

K= 110 (Suelos granulares finos)

Promedio

CBR= 3,56 %

Fuente: Elaboración propia

3.6 DATOS INICIALES DE CBR ANTES DEL MEJORAMIENTO

Se procedió a la extracción de muestra en un punto del tramo de la av. Jaime Paz Zamora, para realizar los ensayos de caracterización y poder obtener el CBR inicial de la subrasante de dicho tramo.

3.6.1 Contenido de humedad

Una vez extraída la muestra se procedió a realizar el ensayo denominado contenido de humedad, el cual consiste en pesar una cantidad representativa de muestra, introducirlas en taras previamente pesadas, anotar el peso de la tara más la muestra, para luego realizar el secado en el horno a una temperatura de 100 – 105°C aproximadamente durante 24 horas para obtener el contenido de agua que existe en el material.

Figura 29: Pesaje de taras



Fuente: Elaboración propia

Figura 30: Taras con material antes de introducirse al horno



Fuente: Elaboración propia

De este ensayo se obtuvo los siguientes resultados

Tabla 9: Humedad natural del suelo

HUMEDAD NATURAL				
Cápsula	1	2	3	4
Peso de suelo húmedo + Cápsula	66,3	72,3	77,1	80,50
Peso de suelo seco + Cápsula	62,76	68,92	74,1	78,50
Peso de cápsula	12	13	12,5	13,80
Peso de suelo seco	50,76	55,92	61,6	64,7
Peso del agua	3,54	3,38	3	2
Contenido de humedad	6,97	6,04	4,87	3,09
PROMEDIO	5,24			

Fuente: Elaboración propia

3.6.2 Granulometría de suelos

Se realizó el ensayo de granulometría por el método del lavado ya que el material extraído era suelo fino.

El método del lavado, se usa para el material que pasa el tamiz N°10, la muestra se debe dejar reposar en agua por 24 horas hasta que sature completamente, logrando con el suelo una pasta suave, similar al barro o lodo.

Pasadas las 24 horas se introduce la muestra en la malla N°200, para que con ayuda del agua se pueda lavar el suelo hasta que el agua pasante se torne clara y sin sedimentación.

Figura 31: Lavado de material



Fuente: Elaboración propia

Luego el material que se retiene en la malla N°200 se debe disponer dentro de un recipiente para realizar el secado del suelo y proceder a tamizar por las mallas N°40 y N°200.

Figura 32: Tamizado del suelo



Fuente: Elaboración propia

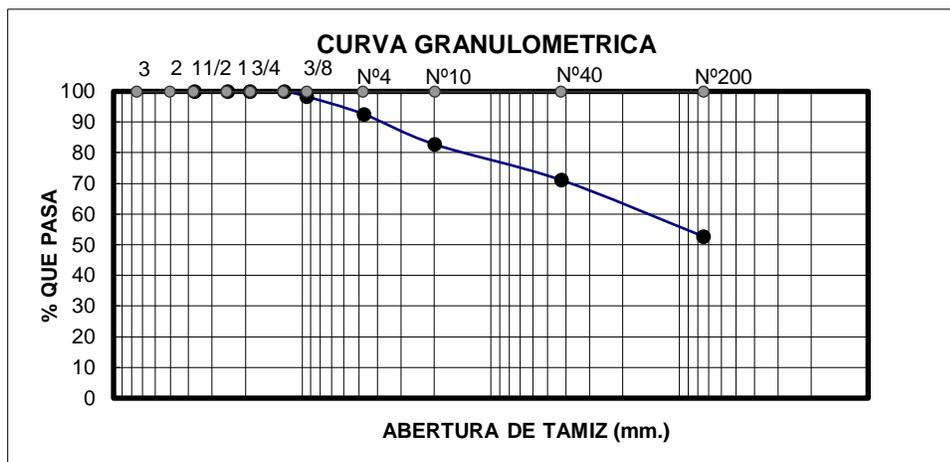
Se debe pesar el material retenido en cada malla dispuesta para el fino, para realizar los cálculos correspondientes.

Tabla 10: Cálculos granulométricos

Peso Total (gr.)			3000		
Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% Que Pasa
	(mm)	(gr)	(gr)		del Total
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,50	50,00	50,00	1,67	98,33
N°4	4,75	170,64	220,64	7,35	92,65
N°10	2,00	295,48	516,12	17,20	82,80
N°40	0,43	350,21	866,33	28,88	71,12
N°200	0,075	550,69	1417,02	47,23	52,77
base	-	80,97	1497,99	49,93	50,07

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 1: Curva granulométrica



Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Determinación de la consistencia de suelos

3.6.3.1 Límite líquido

Se prosiguió con el ensayo de determinación de consistencia de los suelos, el cual consiste en dos partes primero en determinar el límite líquido, el cual se mide en laboratorio mediante una mezcla de suelo y agua, capaz de ser moldeada el que se deposita en la copa de Casagrande y se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela hasta que el surco que previamente fue recortado se cierre en una longitud de 12 mm.

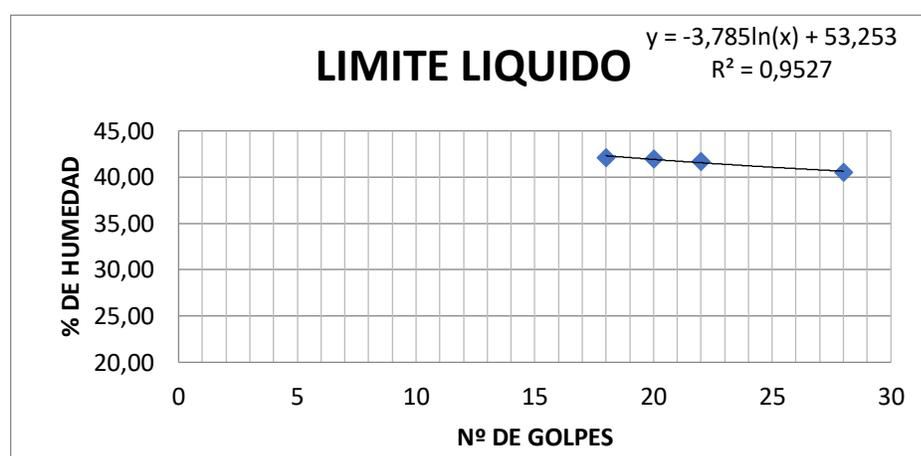
Para determinar el límite líquido se debe trazar una gráfica con el número de golpes en coordenadas logarítmicas, con el contenido de humedad correspondiente, en coordenadas normales, e interpolar para la humedad correspondiente a 25 golpes. La humedad que se obtiene es el límite líquido.

Tabla 11: Determinación del límite líquido

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	18	20	22	28
Suelo Húmedo + Cápsula	52,92	61,30	53,12	58,52
Suelo Seco + Cápsula	44,97	50,76	45,19	49,63
Peso del agua	7,95	10,54	7,93	8,89
Peso de la Cápsula	26,11	25,66	26,19	27,70
Peso Suelo seco	18,86	25,1	19	21,93
Porcentaje de Humedad	42,15	41,99	41,74	40,54

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2: Límite líquido



Fuente: Elaboración propia

3.6.3.2 Límite plástico

La determinación del límite plástico se realiza mediante un procedimiento normalizado pero sencillo, a la muestra preparada con agua debe agregarse material seco que pase por el tamiz N°40 y mezclar homogéneamente, se debe disponer de una superficie inerte (vidrio) y pesar tres cápsulas limpias para registrar en la planilla de límite plástico.

Se realiza una mezcla de agua y suelo, la cual se amasa entre los dedos, hasta conseguir un cilindro de 3 mm de diámetro. Llegando a este diámetro se desarma el cilindro y vuelve a amasarse hasta lograr nuevamente un cilindro de 3 mm. Esto se realiza hasta que el cilindro presente agrietamientos lo cual quiere decir que se encuentra con la humedad del

límite plástico. Con la espátula se debe cortar los trozos donde se encuentren las rajaduras e introducir al horno, es recomendable realizar este procedimiento al menos 3 veces.

Figura 33: Amasado de cilindros



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Determinación del límite plástico

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	27,25	28,54	28,80
Peso de suelo seco + Cápsula	26,82	27,80	27,99
Peso de cápsula	25,72	25,97	25,91
Peso de suelo seco	1,10	1,83	2,08
Peso del agua	0,43	0,74	0,81
Contenido de humedad	39,09	40,44	38,94

Fuente: Elaboración propia

3.6.4 Ensayo de compactación

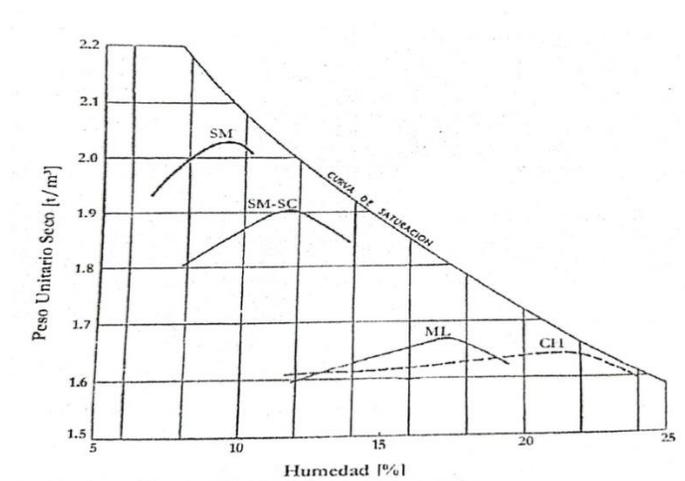
Se debe conocer la granulometría del material porque de esta dependerá la elección del método adecuado para la realización del ensayo.

Previamente se debe secar la muestra al aire o en horno a una temperatura menor que 60 °C, hasta que se vuelva desmenuzable.

De acuerdo a la granulometría este ensayo se realizará por el método B Proctor estándar (basadas en las 698-91 de la ASTM)

Pasar el material por el tamiz 3/4", descartar el material retenido, con ayuda de la curva de saturación se pueden adoptar los valores de contenido de humedad, se debe obtener 2 puntos de porcentaje por debajo del contenido de humedad óptimo y también 2 puntos que excedan el contenido óptimo de humedad.

Figura 34: Curva de Saturación



Fuente: Texto guía para laboratorio mecánica de suelos I

Se debe mezclar completamente la muestra escogida con agua, teniendo en total 4 puntos.

Figura 35: Mezcla de muestras



Fuente: Elaboración propia

Se procede a registrar el peso del molde sin collarín, para luego ensamblar el molde a la base ajustando el collarín al equipo para luego introducir la muestra.

Teniendo en cuenta que nuestro ensayo es por T-99 Proctor estándar tenemos 3 capas de material a 25 golpes cada una, los golpes deben ser uniformemente distribuidos con el martillo.

Se procede a retirar el collarín para enrasar el material con la regla metálica, luego se pesa el molde con su base más suelo húmedo.

Figura 36: Retiro de collarín



Fuente: Elaboración propia

Se debe extraer material del corazón de la muestra para así determinar el contenido de humedad real del suelo compactado.

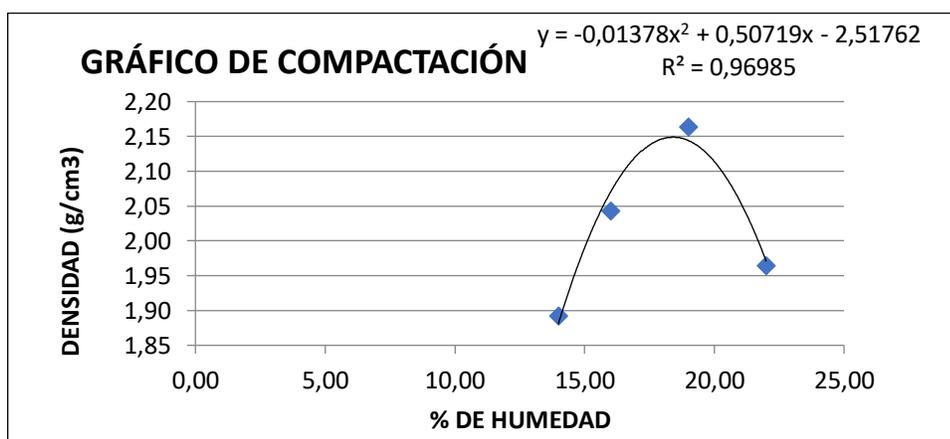
Se repite los anteriores pasos con los diferentes contenidos de humedad para tener los puntos necesarios para graficar la curva de compactación.

Tabla 13: Determinación de la densidad máxima vs contenido óptimo de humedad

Nº de capas	3	3	3	3
Nº de golpes por capa	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde	6195,5	6397,7	6591,8	6422,8
Peso del molde	4152	4152	4152	4152
Peso suelo húmedo	2043,5	2245,7	2439,8	2270,8
Volumen de la muestra	947,3	947,3	947,3	947,3
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	2,16	2,37	2,58	2,40
Cápsula Nº	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula	41,3	39,4	47,6	49
Peso suelo seco + cápsula	38,44	35,87	43,05	43,61
Peso del agua	2,86	3,53	4,55	5,39
Peso de la cápsula	18	13,8	19,1	19,1
Peso suelo seco	20,44	22,07	23,95	24,51
Contenido de humedad (%h)	13,99	15,99	19,00	21,99
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1,89	2,04	2,16	1,97

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3: Curva de compactación



Fuente: Elaboración propia

3.6.5 Relación soporte de california (CBR)

Se prepara una muestra de tamaño igual o superior a 30 kg. Esta muestra se deberá secar en un horno a una temperatura menor que 60 °C, hasta que se vuelva desmenuzable para después dividir entre tres muestras para cada molde.

Al momento de iniciar el ensayo se debe disponer de dos humedades; la humedad inicial para el ensayo y la humedad óptima extraída del T-99. Para que cada fracción tenga la

humedad óptima hay que agregar el agua suficiente partiendo del valor de la humedad inicial del suelo.

3.6.5.1 Proceso de compactación para CBR

La muestra se pasa por el tamiz 3/4" descartando el material retenido, se debe ensamblar el molde a la base metálica perforada y se asegura con los tornillos dispuestos en los laterales.

Se introduce al molde un disco espaciador de 2 ½", que debe llevar encima un papel filtro cortado en el diámetro del mismo disco.

Se dispone la parte superior (collarín) ajustándolo para que no se afloje durante el proceso de compactado.

Se debe adicionar la muestra y se procede a compactar con el martillo de 5,5 libras y 12 pulgadas de caída libre y cinco capas de compactación, los golpes serán; 12, 25, y 56 golpes por cada capa para cada molde.

Luego de la compactación se quita con cuidado el collarín, teniendo en cuenta de no extraer suelo pegado por debajo de la junta entre el collarín y el molde de CBR.

Con un enrasador metálico se tiene que alisar la superficie expuesta del suelo compactado hasta que la superficie coincida con el borde superior del molde de CBR. Se cubre con un papel filtro con el mismo diámetro.

Figura 37: Alisando superficie con un enrasador



Fuente: Elaboración propia

3.6.5.2 Volcado del molde más la muestra

Se debe aflojar los pernos laterales del molde metálico, de forma vertical se levanta el molde más la muestra compactada quedando expuesto el disco espaciador que debe ser separado de la base perforada del molde.

El suelo del collarín se debe desechar y la superficie debe alisarse con un enrasador metálico; antes de realizar el volcado del molde se debe colocar un papel filtro para cubrir las partes expuestas del suelo compactado.

Se realiza el vuelco vertical del molde más suelo compactado quedando la parte del suelo alisada en el lado de abajo, se dispone sobre la base perforada realizando el ajuste lateral correspondiente; se procede al pesado registrando el dato de “masa de molde más suelo compactado”.

El procedimiento se repite en cada molde cambiando el número de golpes: molde 1 (12 golpes), molde 2 (25 golpes), molde 3 (56 golpes); el número de golpes es por cada capa en cinco capas por molde.

3.6.5.3 Expansión del material

Se procede a la obtención de la altura real del suelo compactado; se dispone papel filtro sobre la cara superior del suelo y emplazar sobre este una placa circular metálica (plato perforado) con un vástago central.

Figura 38: Emplazando placa circular



Fuente: Elaboración propia

Se procede a realizar la primera lectura de su nivel inicial sin hinchamiento; mediante el uso de un trípode provisto de un extensómetro, se dispone del mismo apoyando sus patas a los bordes del molde teniendo en cuenta que la punta del trípode esté en contacto con la cabeza del vástago, se hace la lectura inicial de la manecilla del extensómetro anotando como (Li).

Figura 39: Lectura inicial con extensómetro



Fuente: Elaboración propia

3.6.5.4 Curado en el CBR

Se debe introducir todo el molde dentro del depósito con agua cuyo nivel se encuentre 1 cm por debajo del nivel superior del molde.

Figura 40: Moldes dentro del depósito de agua



Fuente: Elaboración propia

Se montará el trípode con un extensómetro, cuyo vértice inferior se conecte con la cabeza del vástago, en ese punto se debe tomar una lectura inicial.

Cada 24 horas y por un periodo de 96 horas (4 días), se registran las lecturas del extensómetro.

3.6.5.5 Resistencia a la penetración

Luego de 96 horas de saturación se extrae el molde y se deja drenar de 15 a 30 minutos aproximadamente, seguidamente se debe quitar el plato perforado dejando solo las pesas

Se tiene que disponer el molde de suelo ya drenado con las pesas sobre la base de una prensa hidráulica que hace un movimiento vertical ascendente contra el pistón de penetración acoplado al anillo dinamométrico.

Se debe controlar el movimiento ascendente del molde con mediciones de su desplazamiento vertical, para ello se acopla un extensómetro independiente del anillo y cuya punta inferior esté en contacto con el borde del molde.

El otro sistema de medición es la deformación del anillo dinamométrico, que consta de un extensómetro cuya punta inferior tiene contacto vertical con el anillo en tal sentido puede medir su deformación.

Figura 41: Resistencia a la penetración



Fuente: Elaboración propia

El valor de la deformación marcada por el extensómetro del anillo que se encuentra en unidades de longitud debe ser transformada en un valor de fuerza, para esto existe una ecuación de calibración propia del anillo.

En su parte inferior el anillo tiene acoplado un pistón rígido de acero que en oposición al movimiento ascendente de la prensa presiona contra el suelo penetrando hasta una profundidad de 0,5" media pulgada.

El control del ensayo es por el desplazamiento vertical que por norma asume los siguientes valores; 0,025", 0,05", 0,075", 0,1", 0,2", 0,3", 0,4", 0,5".

En cada lectura del desplazamiento vertical se hace una lectura de la deformación del anillo mediante el extensómetro ubicado en su centro.

Una vez que hincada la 1/2" del pistón que es la última lectura, se procede a volver la prensa a su forma original para sacar el molde de la misma.

Del molde más el suelo se quitan las pesas y procede al retiro de muestras para el control de las humedades, las cuales son; una del fondo, una de la superficie y otra a 2” de profundidad contando desde la superficie. Una vez extraídas las muestras se disponen las cápsulas al horno a más de 110°C durante 24 horas para obtener la masa de suelo seco más cápsula. El resto es cálculo del contenido de humedad.

Tabla 14: Contenido de humedad y peso unitario

Nº capas	5		5		5				
Nº golpes por capa	12		25		56				
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse	D. de M	Antes de mojarse	D. de M	Antes de mojarse	D. de M			
Peso muestra húm.+molde	11520,00	12040,00	11245,00	11635,00	11530,00	11770,00			
Peso Molde	7855,00	7855,00	7210,00	7210,00	7120,00	7120,00			
Peso muestra húmeda	3665,00	4185,00	4035,00	4425,00	4410,00	4650,00			
Volumen de la muestra	2122,74	2122,74	2119,23	2119,23	2118,12	2118,12			
Peso Unit. Muestra Húm.	1,73	1,97	1,90	2,09	2,08	2,20			
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	Medio	Fondo	Superf.	Medio	Fondo	Superf.	Medio
Tara N°	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	3,00
Peso muestra húm + tara	50,44	46,38	45,48	37,62	45,28	48,07	46,45	49,96	56,27
Peso muestra seca + tara	41,90	37,75	40,54	32,47	37,53	41,86	40,75	41,66	49,32
Peso del agua	8,54	8,63	4,94	5,15	7,75	6,21	5,70	8,30	6,95
Peso de tara	12,80	12,50	13,6	12,40	13,50	14,40	13,20	12,40	11,60
Peso de la muestra seca	29,10	25,25	26,94	20,07	24,03	27,46	27,55	29,26	37,72
Contenido humedad %	29,35	34,18	18,33705	25,66	32,25	22,61	20,69	28,37	18,43
Promedio cont. Humedad	31,76		18,34	28,96		22,61	24,53		18,43
Peso Unit.muestra seca	1,31		1,67	1,48		1,70	1,67		1,85

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Expansión

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE Nº 1			MOLDE Nº 2			MOLDE Nº 3		
			LECT.		EXPANSION	LECT.		EXPANSION	LECT.		EXPANSION
			EXTENS.	cm	%	EXTENS.	cm	%	EXTENS.	cm	%
22-nov	10:50	1	17,95	1,80	0,00	16,90	1,69	0,00	17,00	1,70	0,00
23-nov	10:50	2	19,50	1,95	1,33	19,50	1,95	2,23	19,50	1,95	2,15
24-nov	10:50	3	21,63	2,16	3,17	21,30	2,13	3,77	21,00	2,10	3,44
25-nov	10:50	4	23,70	2,37	4,95	22,50	2,25	4,80	22,20	2,22	4,48
										%Exp. Total=	4,74

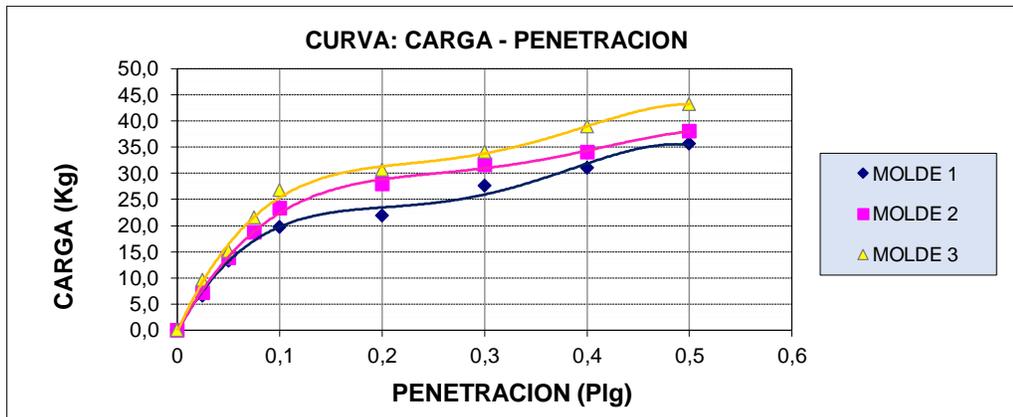
Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: CBR

PENETRACION		CARGA NORMAL	MOLDE N° 1				MOLDE N° 2				MOLDE N° 3			
Pulg.	mm		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG	
		Kg	Kg	kg/cm ²	Kg	%	Kg	kg/cm ²	Kg	%	Kg	kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,0	0,0			0,0	0,0			0,0	0,0		
0,025	0,63		6,6	0,3			7,2	0,4			9,6	0,5		
0,05	1,27		13,3	0,7			13,9	0,7			15,1	0,8		
0,075	1,9		18,5	1,0			18,8	1,0			21,5	1,1		
0,1	2,54	1360	19,7	1,0		1,4	23,4	1,2		1,7	26,7	1,4		2,0
0,2	5,08	2040	21,8	1,1		1,1	27,9	1,4		1,4	30,7	1,6		1,5
0,3	7,62		27,6	1,4			31,6	1,6			34,1	1,8		
0,4	10,16		31,0	1,6			34,1	1,8			38,9	2,0		
0,5	12,7		35,6	1,8			38,0	2,0			43,2	2,2		

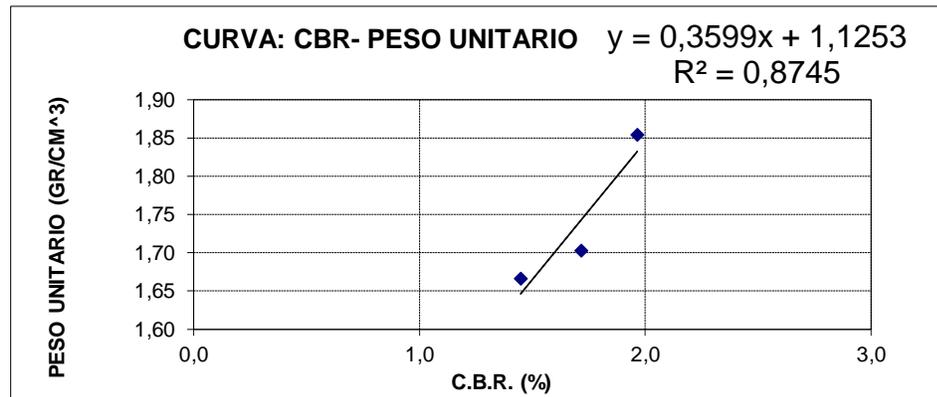
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4: Curva carga- penetración



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5: Curva CBR- Peso unitario



Fuente: Elaboración propia

3.7 TRAMO DE ESTUDIO DE SUBRASANTES MEJORADAS DE BAJA CAPACIDAD PORTANTE

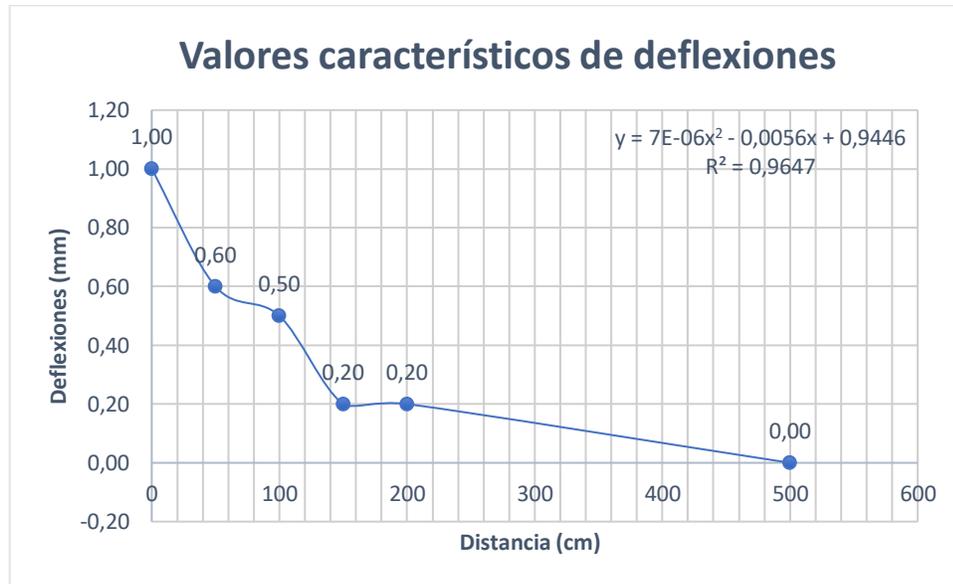
Con la colaboración del SERVICIO DEPARTAMENTAL DE CAMINOS “SEDECA” y el ingeniero Ronald Illescas, encargado del laboratorio de suelos y materiales, se logró identificar el proyecto MEJORAMIENTO CAMINO MATADERO (PORTILLO)-TEMPORAL S. JACINTO NORTE Y SUD-TABLADA-S. LUIS-S. OESTE.

Los datos del ensayo valor soporte california CBR en la subrasante o terreno natural es del 14% mientras los valores del ensayo valor soporte california CBR de la subrasante mejorada es del 63,1 % las planillas con los resultados se muestran en anexos.

3.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los siguientes gráficos de los valores característicos de deflexiones en pavimentos corresponde al primer carril derecho.

Gráfica 6: Valores característicos de deflexiones

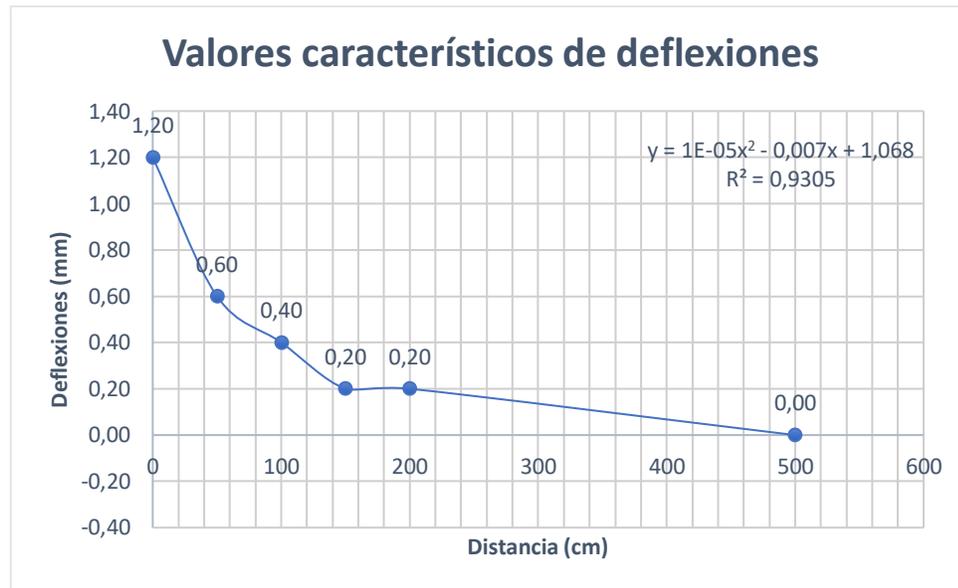


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 1,00 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 7: Valores característicos de deflexiones



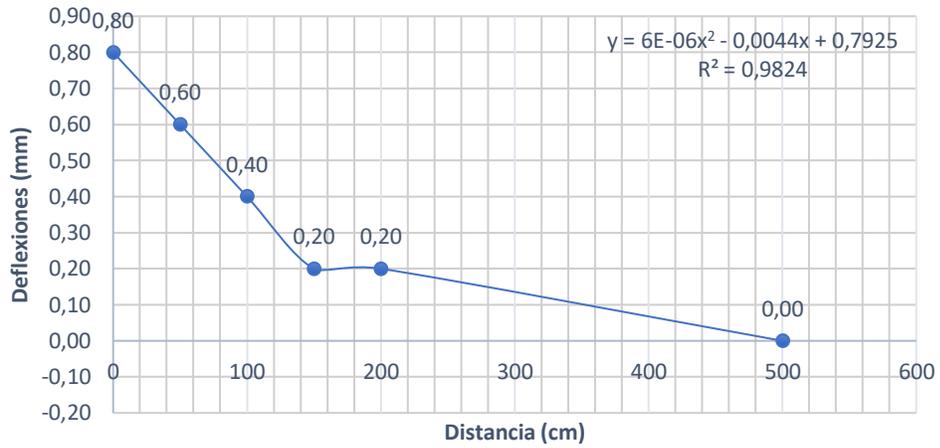
Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 1,20 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 8: Valores característicos de deflexiones

Valores característicos de deflexiones



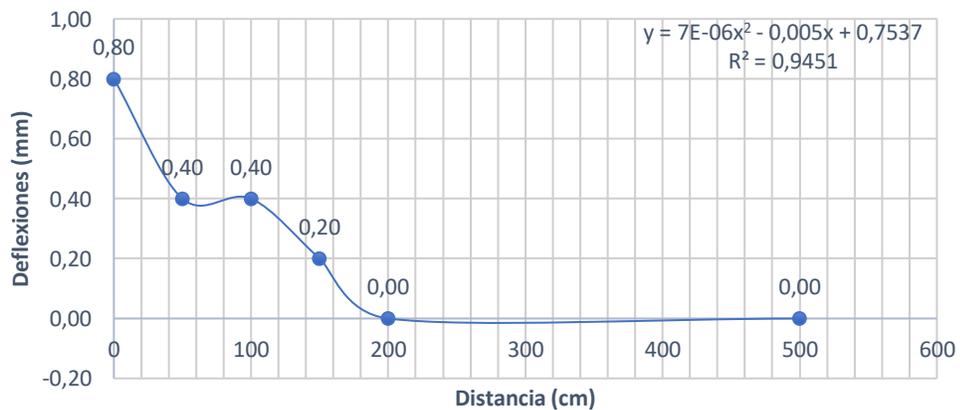
Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 9: Valores característicos de deflexiones

Valores característicos de deflexiones

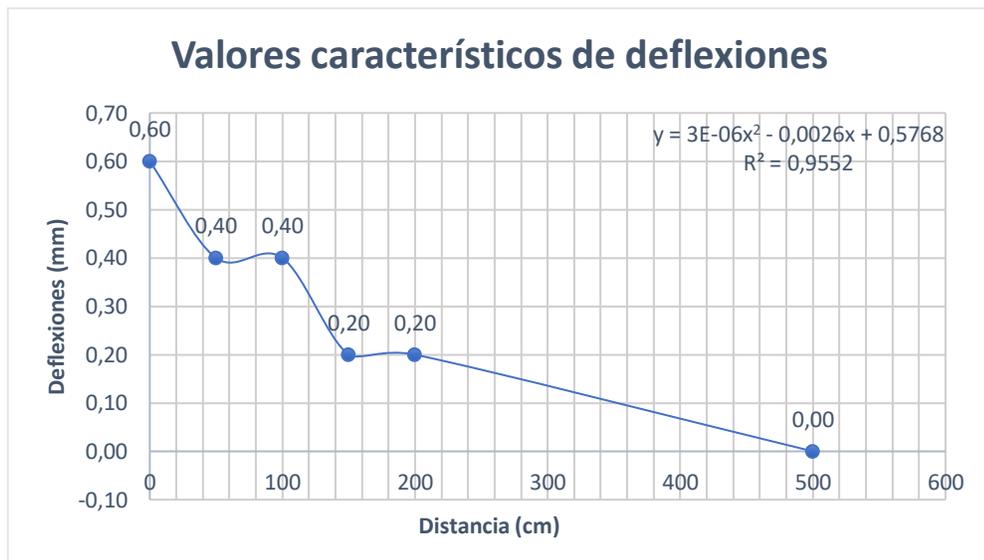


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,00 mm.

Gráfica 10: Valores característicos de deflexiones

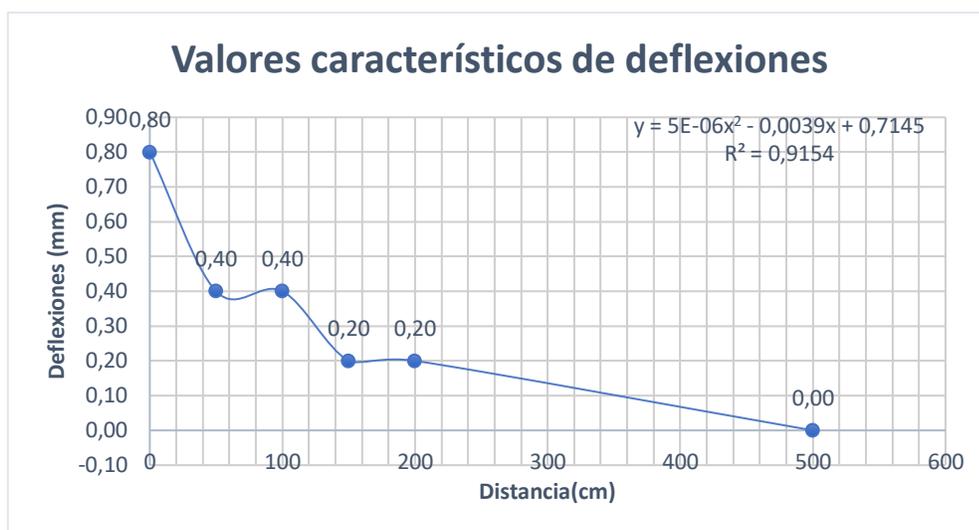


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,60 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 11: Valores característicos de deflexiones

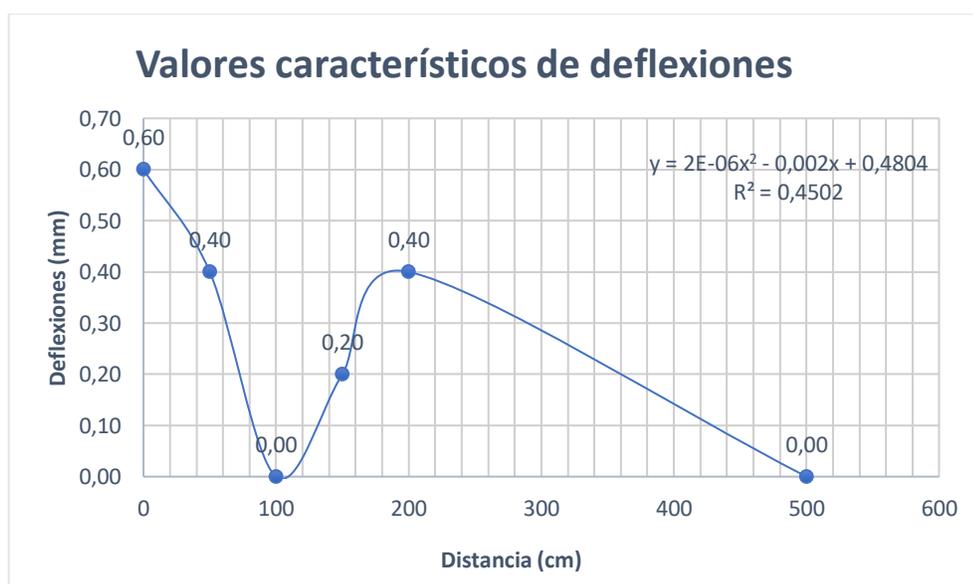


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 12: Valores característicos de deflexiones

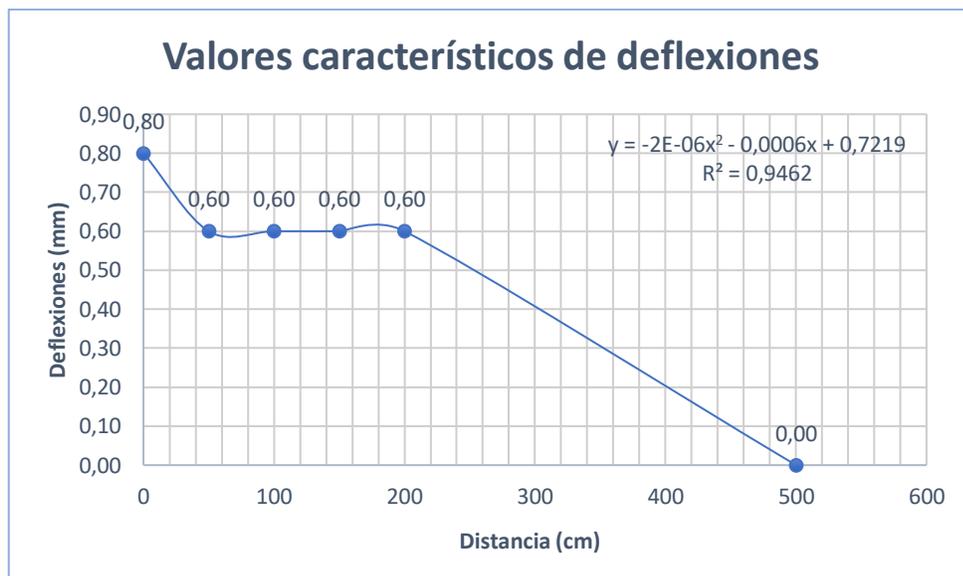


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 4, donde la curva medida es profunda y el pavimento evaluado es malo y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,60 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,00 mm.

Gráfica 13: Valores característicos de deflexiones



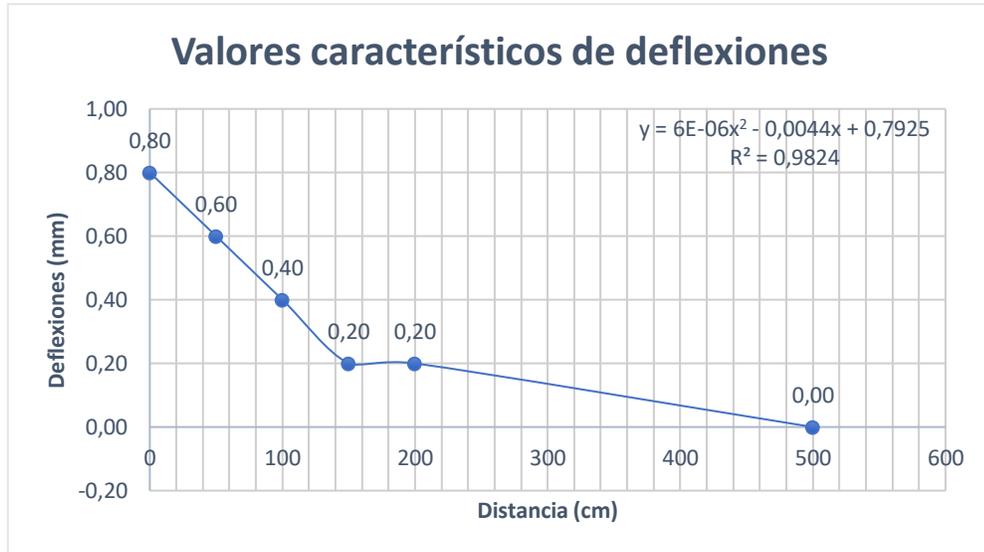
Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 1, donde la curva medida es extensa poco profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante buena.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,60 mm.

Los siguientes gráficos de valores característicos de deflexiones en pavimentos corresponden al carril del medio.

Gráfica 14: Valores característicos de deflexiones

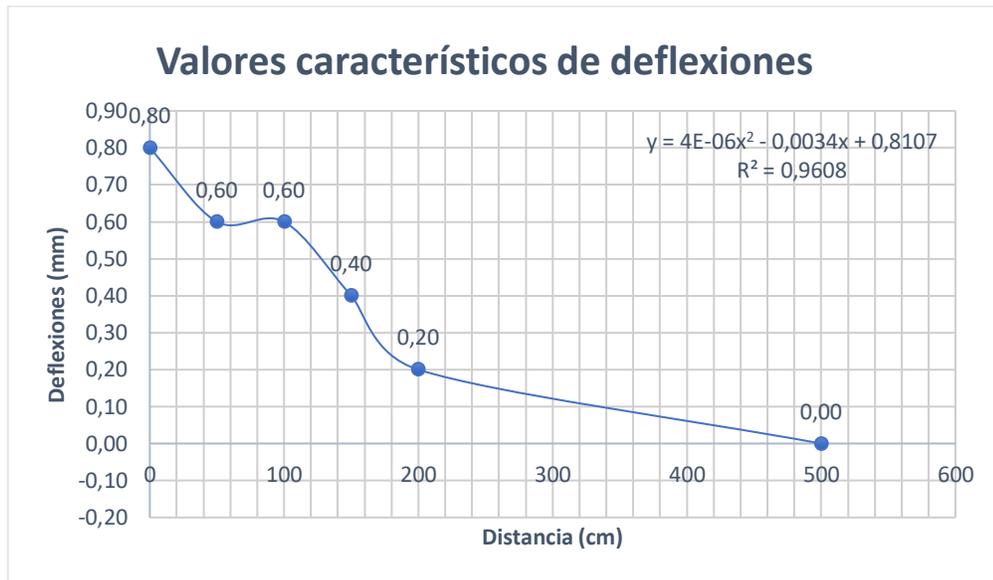


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 15: Valores característicos de deflexiones

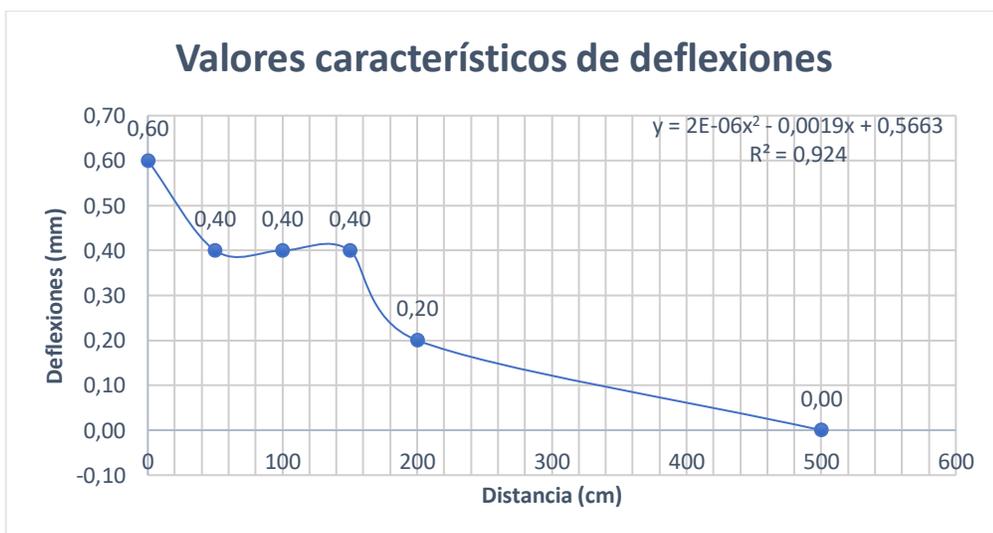


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 16: Valores característicos de deflexiones

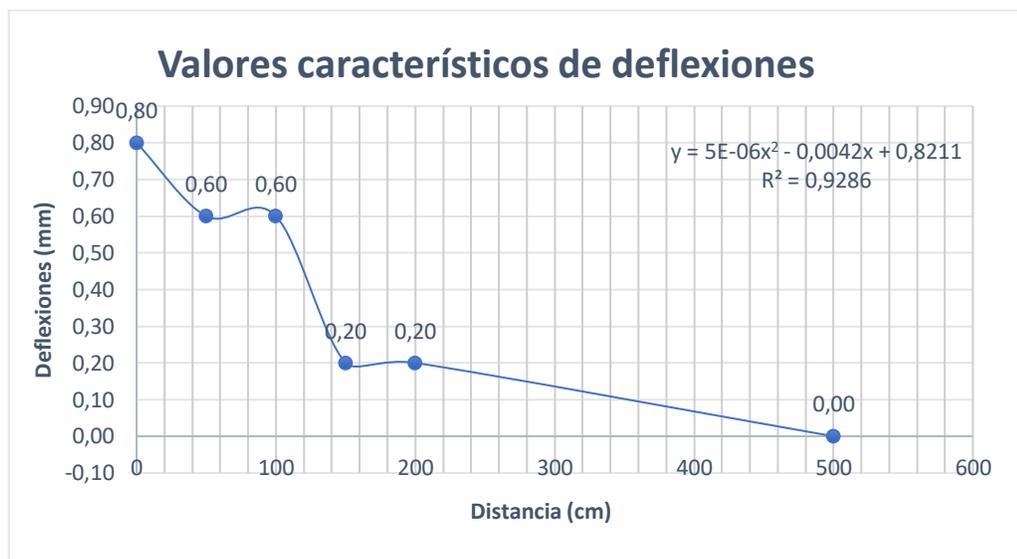


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,60 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 17: Valores característicos de deflexiones

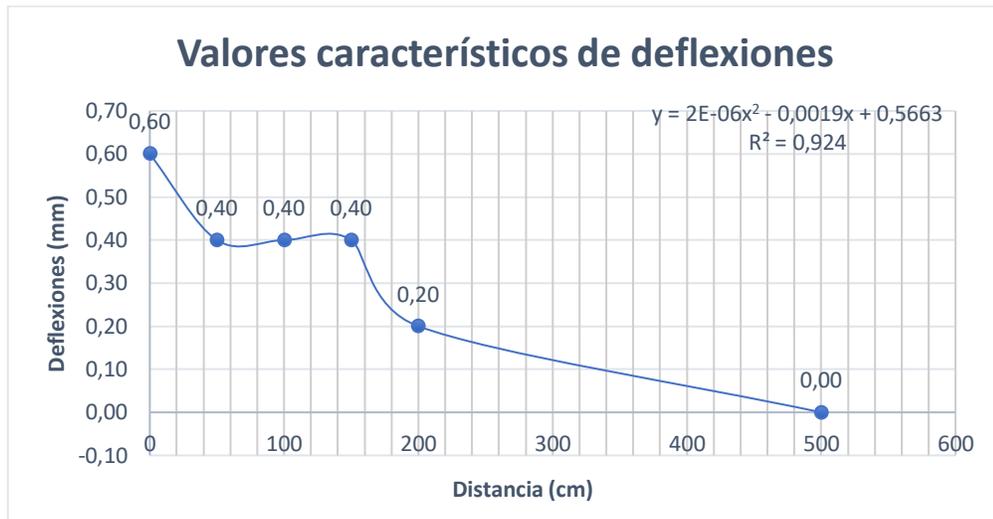


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 18: Valores característicos de deflexiones

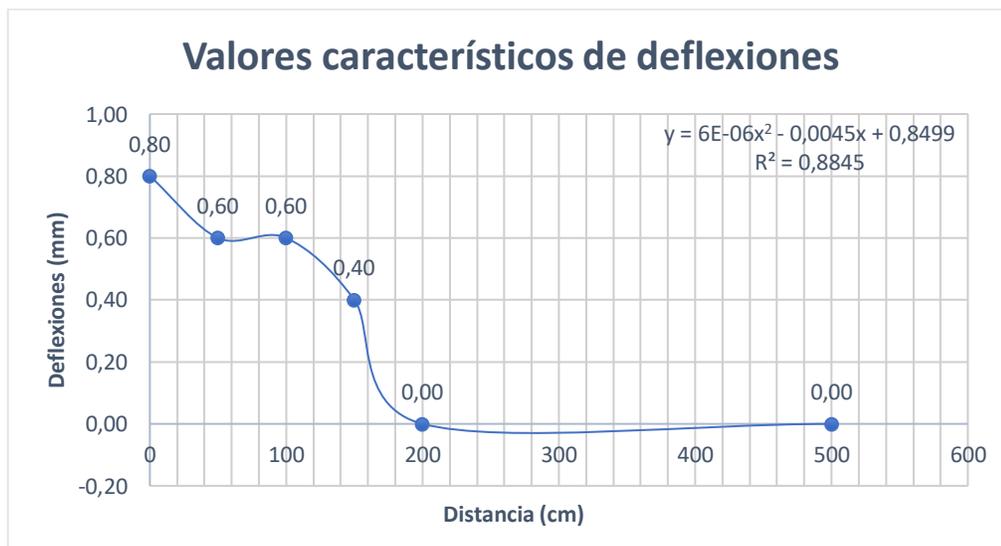


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,60 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 19: Valores característicos de deflexiones

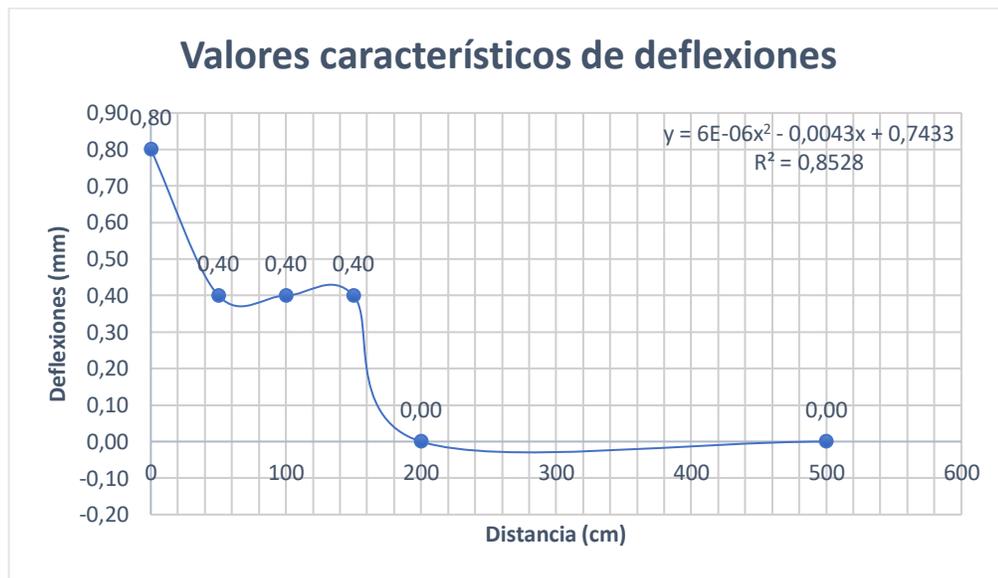


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,00 mm.

Gráfica 20: Valores característicos de deflexiones



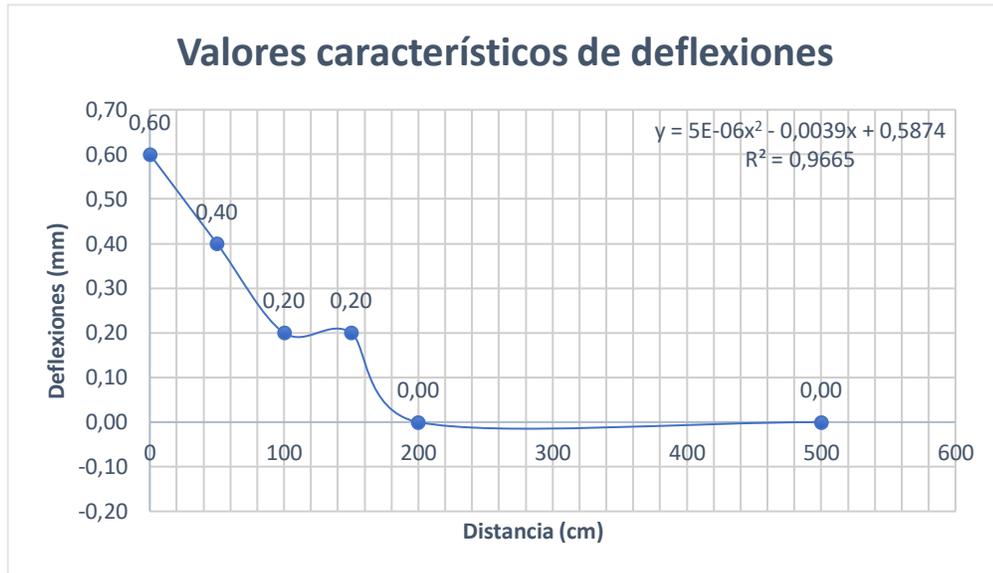
Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,00 mm.

Los siguientes gráficos de valores característicos de deflexiones en pavimentos corresponden al carril derecho de la doble vía.

Gráfica 21: Valores característicos de deflexiones

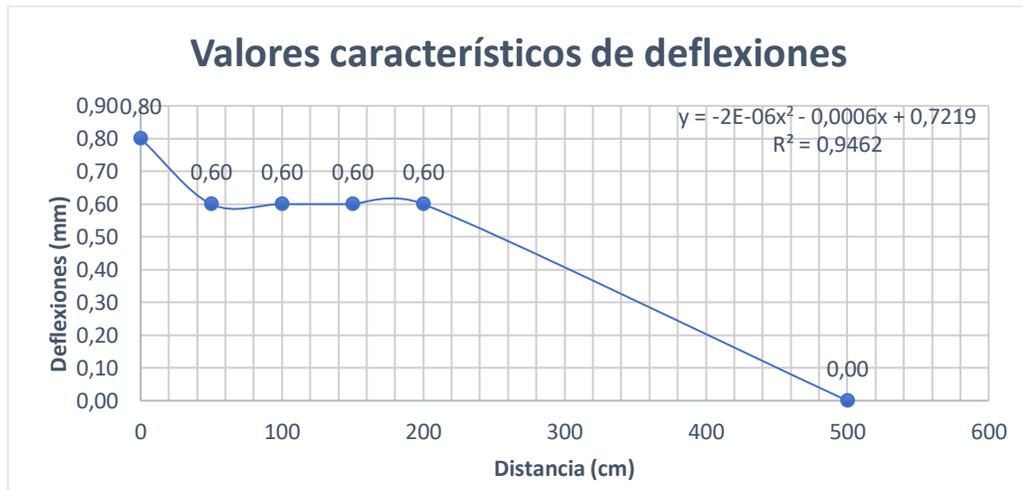


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,60 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,00 mm.

Gráfica 22: Valores característicos de deflexiones

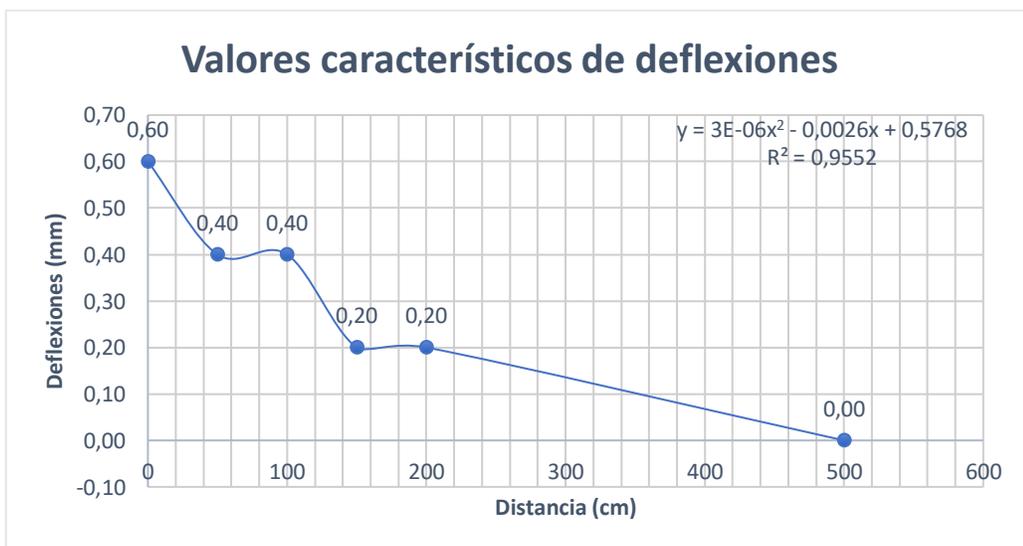


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 1, donde la curva medida es extensa poco profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante buena.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,60 mm.

Gráfica 23: Valores característicos de deflexiones

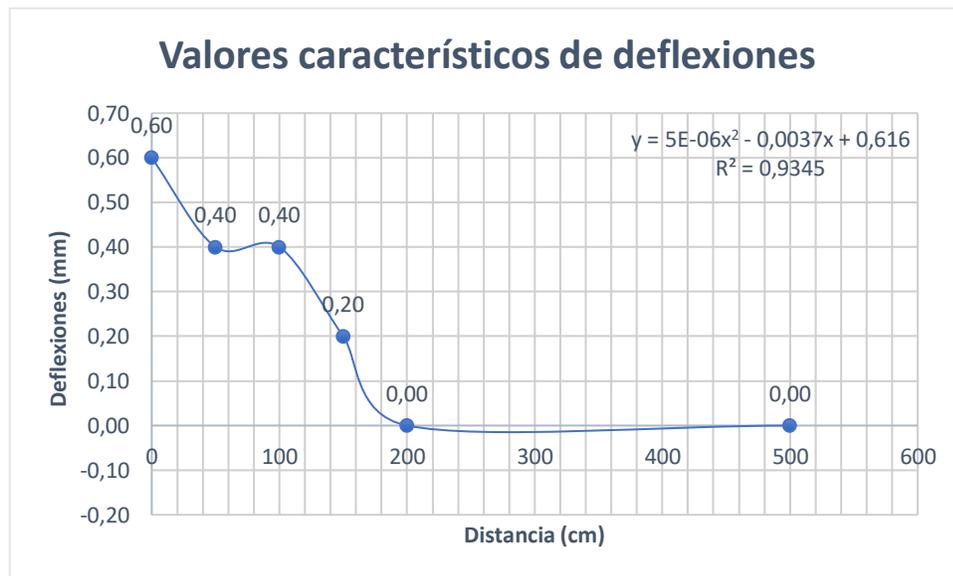


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,60 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 24: Valores característicos de deflexiones

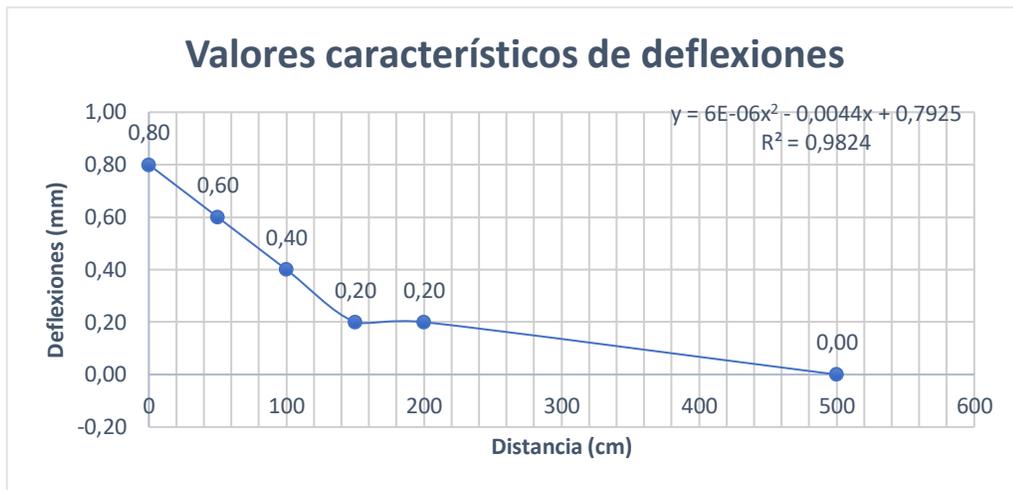


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,60 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,00 mm.

Gráfica 25: Valores característicos de deflexiones

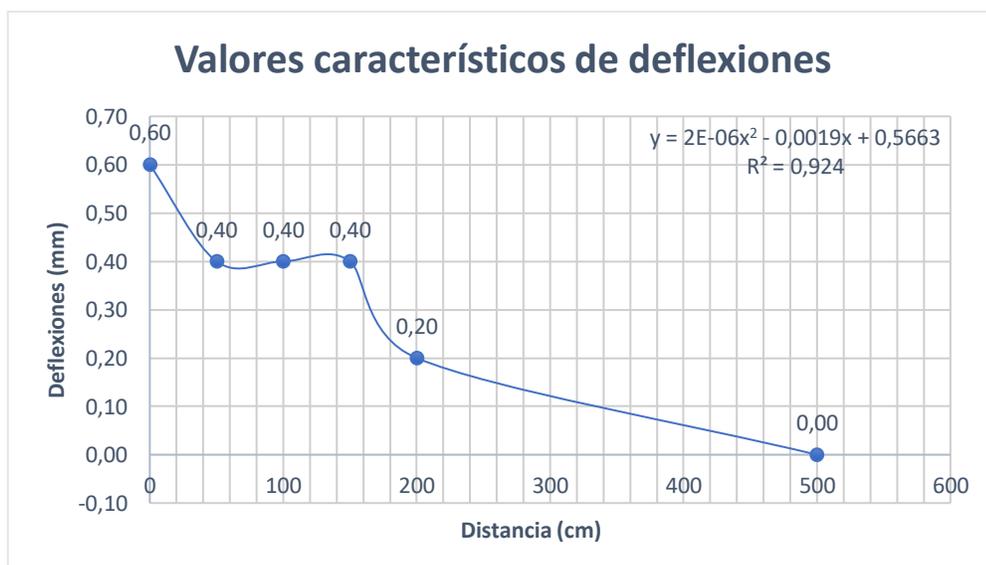


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 26: Valores característicos de deflexiones

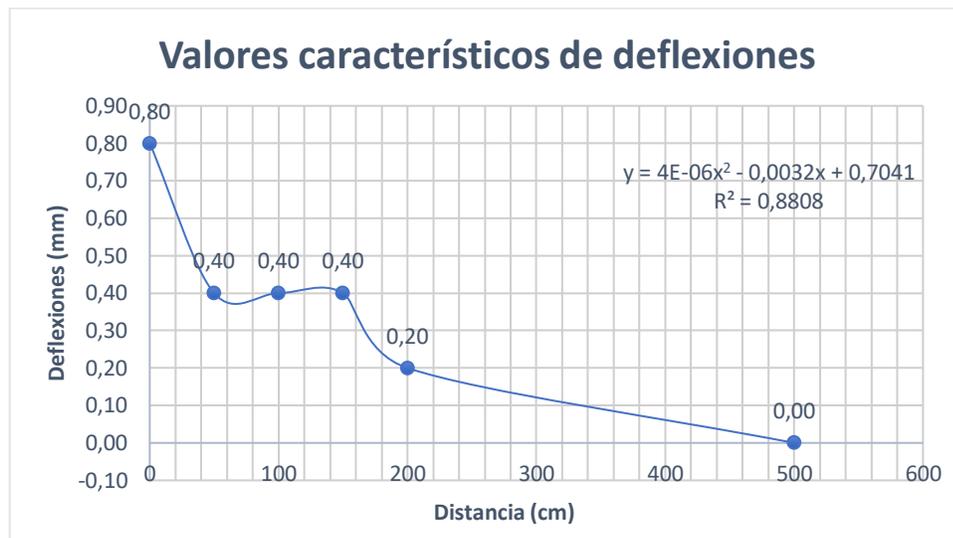


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,60 mm, un punto final de 0,00mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 27: Valores característicos de deflexiones

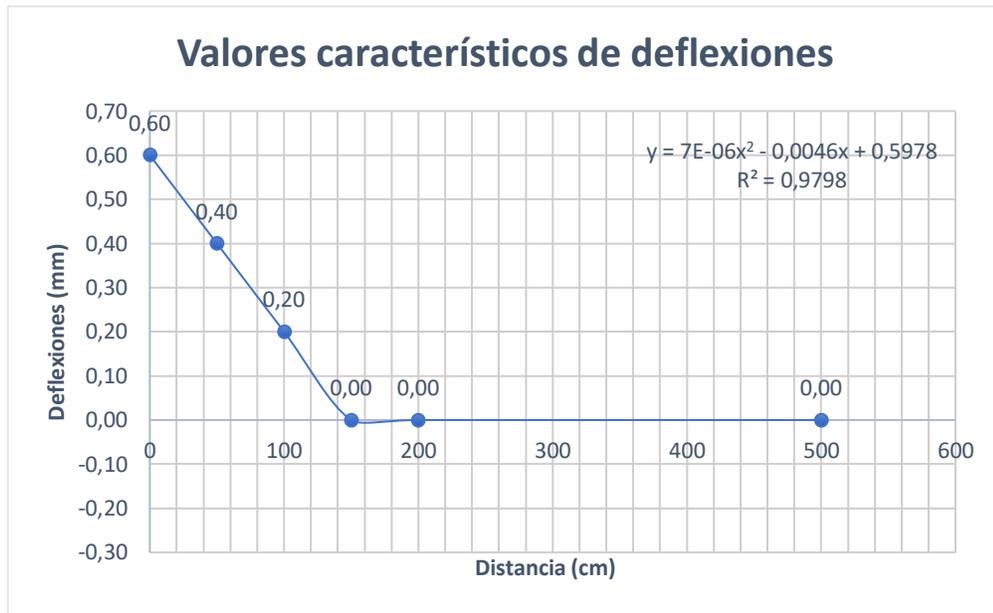


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 28: Valores característicos de deflexiones



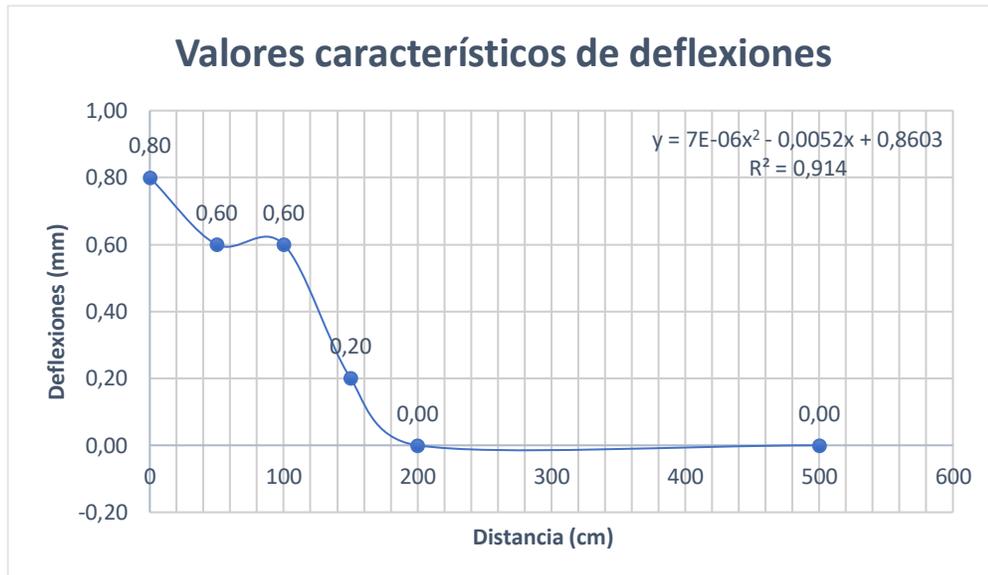
Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,60 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,00 mm.

Los siguientes gráficos de valores característicos de deflexiones en pavimentos corresponden al carril izquierdo de la doble vía.

Gráfica 29: Valores característicos de deflexiones

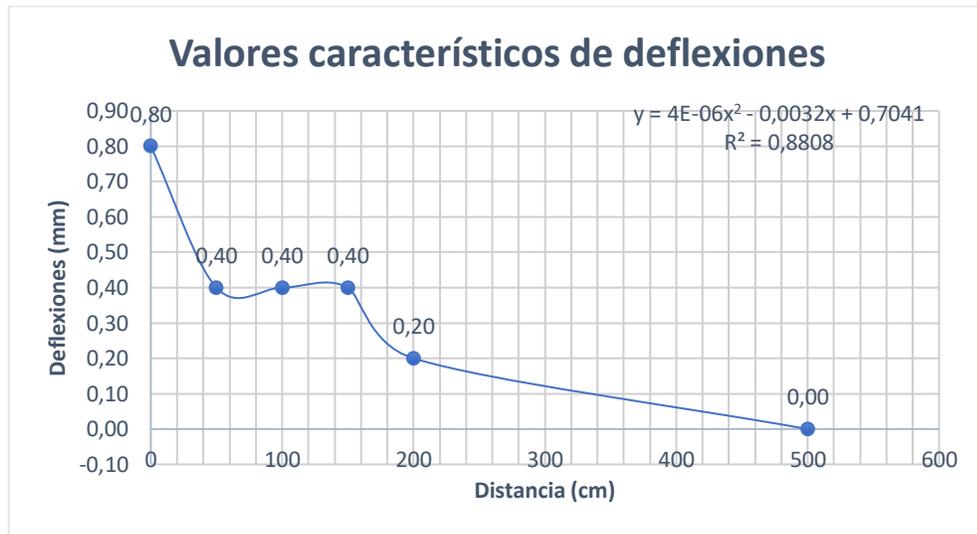


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,00 mm.

Gráfica 30: Valores característicos de deflexiones

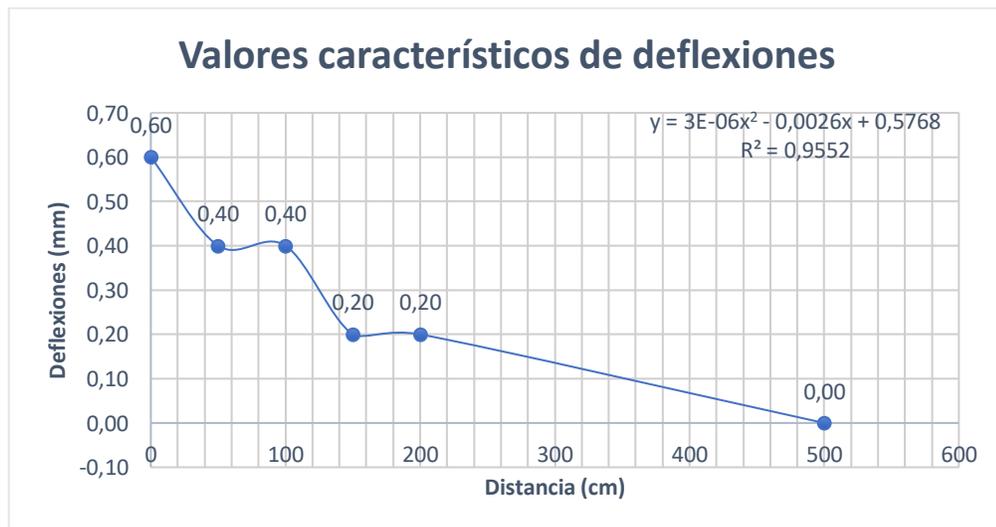


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 31: Valores característicos de deflexiones

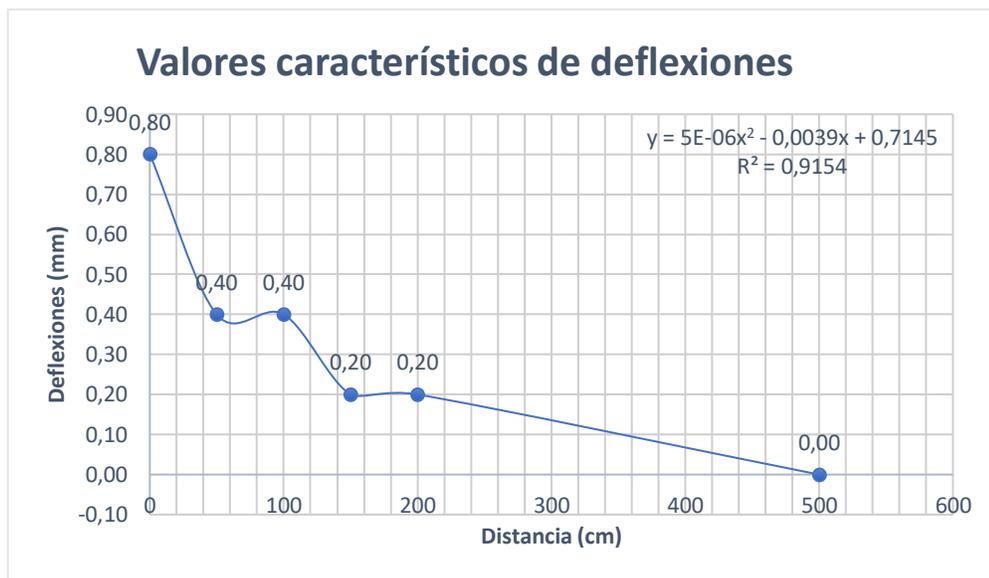


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,60 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 32: Valores característicos de deflexiones

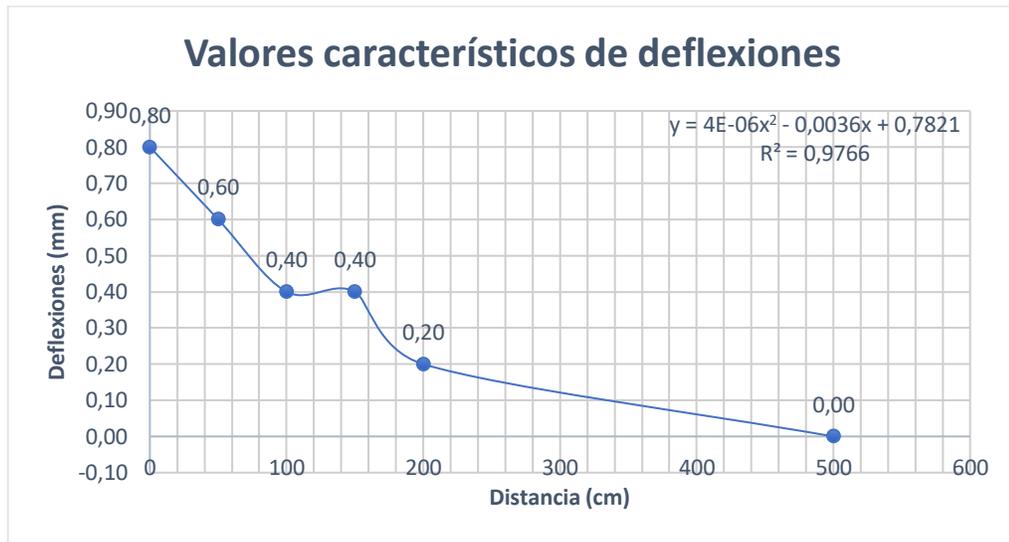


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 33: Valores característicos de deflexiones

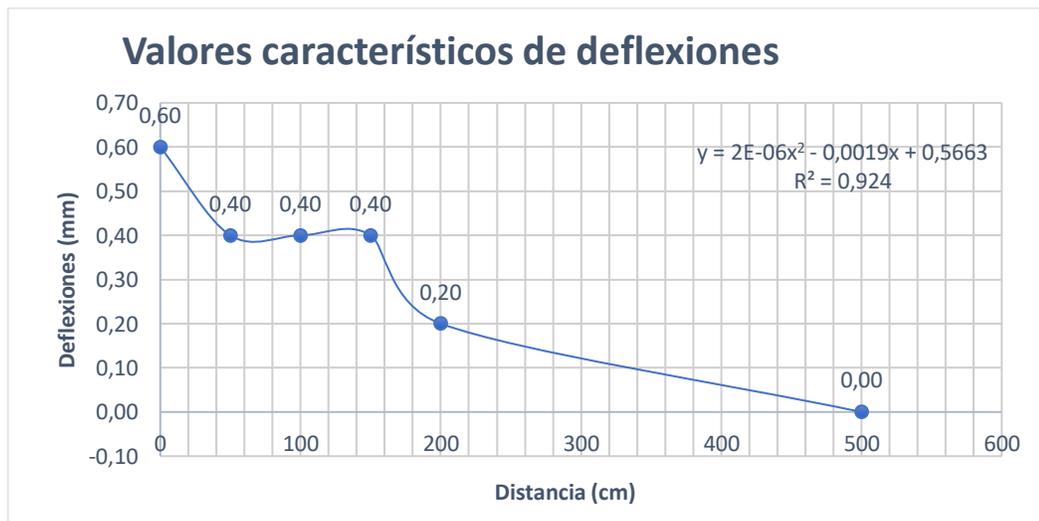


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 34: Valores característicos de deflexiones

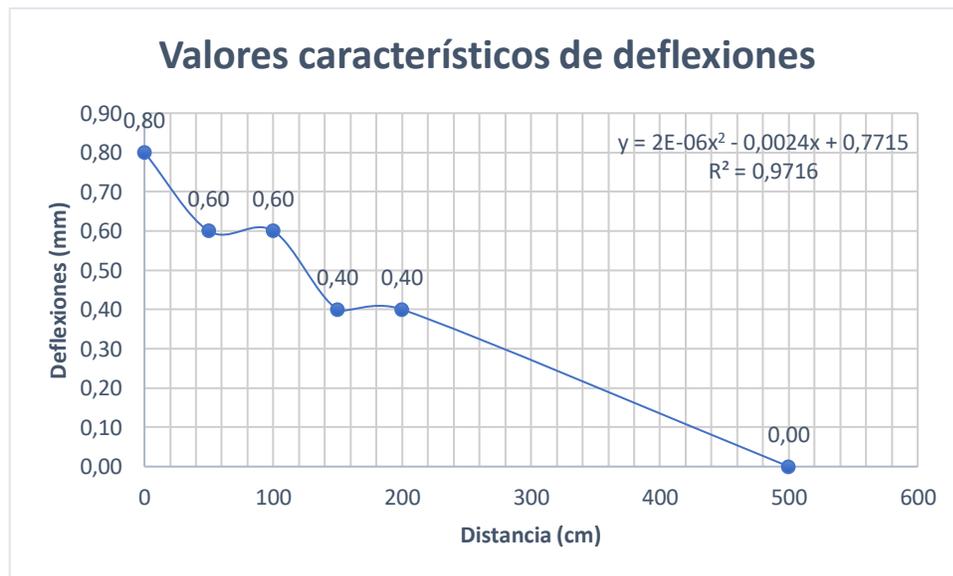


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,60 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

Gráfica 35: Valores característicos de deflexiones

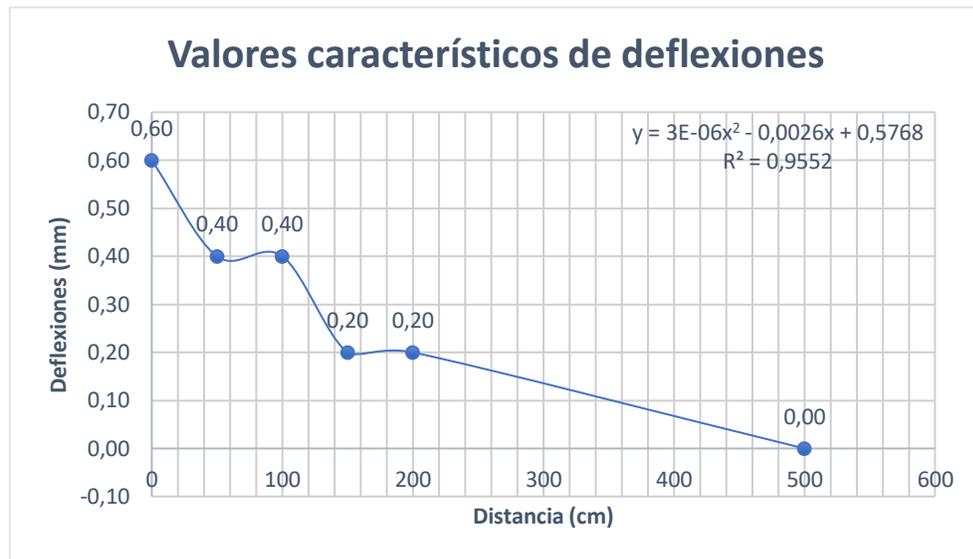


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,80 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,40 mm.

Gráfica 36: Valores característicos de deflexiones

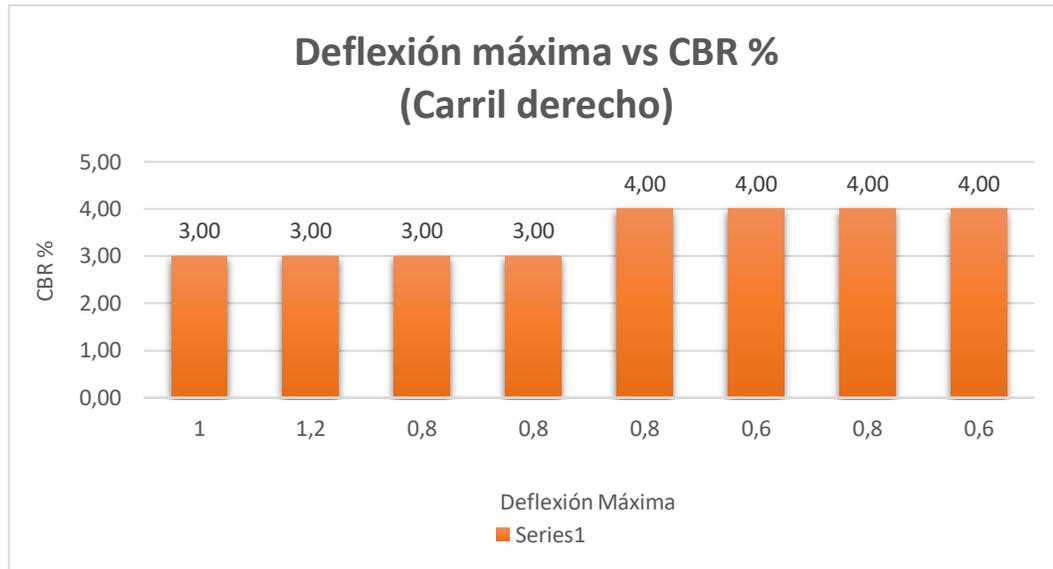


Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación de valores característicos de deflexiones en pavimentos ésta curva pertenece a un tipo 2, donde la curva medida es extensa profunda y el pavimento evaluado es bueno y tiene una subrasante mala.

Se puede observar que la curva tiene un punto inicial de 0,60 mm, un punto final de 0,00 mm y un descenso de 0,20 mm.

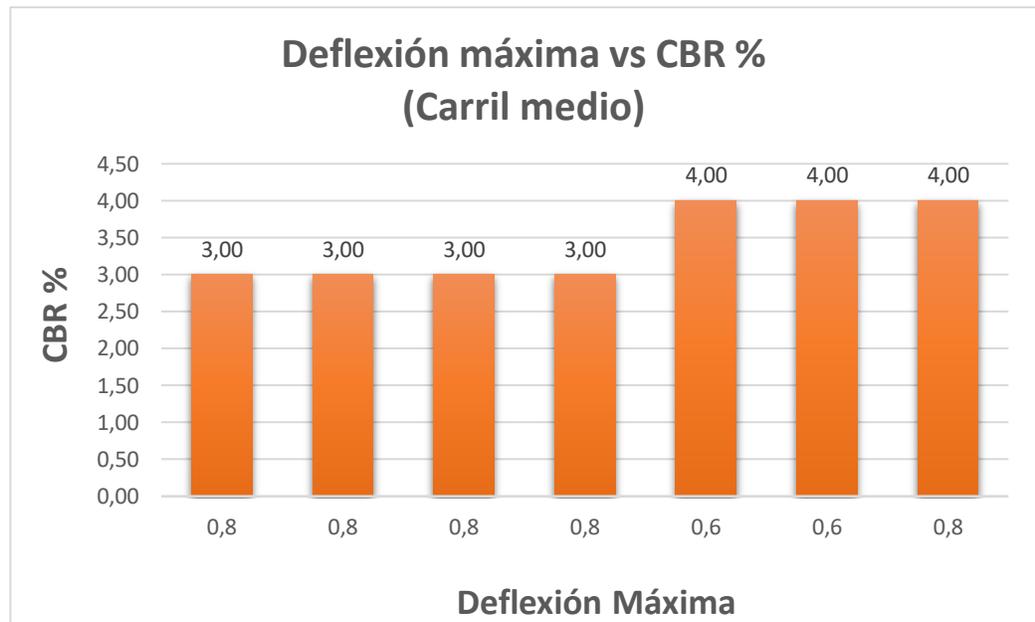
Gráfica 37: Deflexión vs CBR



Fuente: Elaboración propia

- En la presente gráfica que representa al carril derecho, se puede observar que las deflexiones más altas se encuentran en los segmentos 1 y 2 con valores de 1,00 y 1,20 mm y las menores en los segmentos 6 y 8 con valores de 0,60 mm en ambos segmentos.
- Los CBR más altos se encuentran en los segmentos 5, 6, 7 y 8 con valores de 4 (%) en ambos y los menores en los segmentos 1, 2, 3 y 4 con valores de 3 (%)

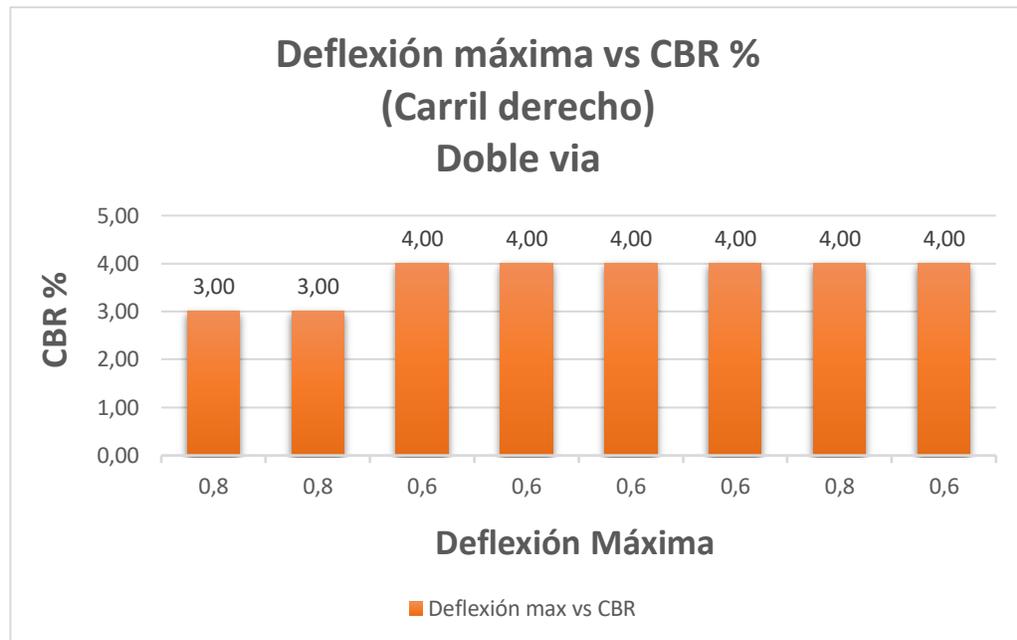
Gráfica 38: Deflexión vs CBR



Fuente: Elaboración propia

- En la gráfica que representa al carril del medio, se puede observar que las deflexiones más altas se encuentran en los segmentos 1, 2, 3, 4 y 7 con valores de 0,80 mm y las menores en los segmentos 5 y 6 con valores de 0,60 mm en ambos segmentos.
- Los CBR más altos se encuentran en los segmentos 5, 6 y 7 con valores de 4 (%) respectivamente y los menores en los segmentos 1, 2, 3 y 4 con valores de 3 (%)

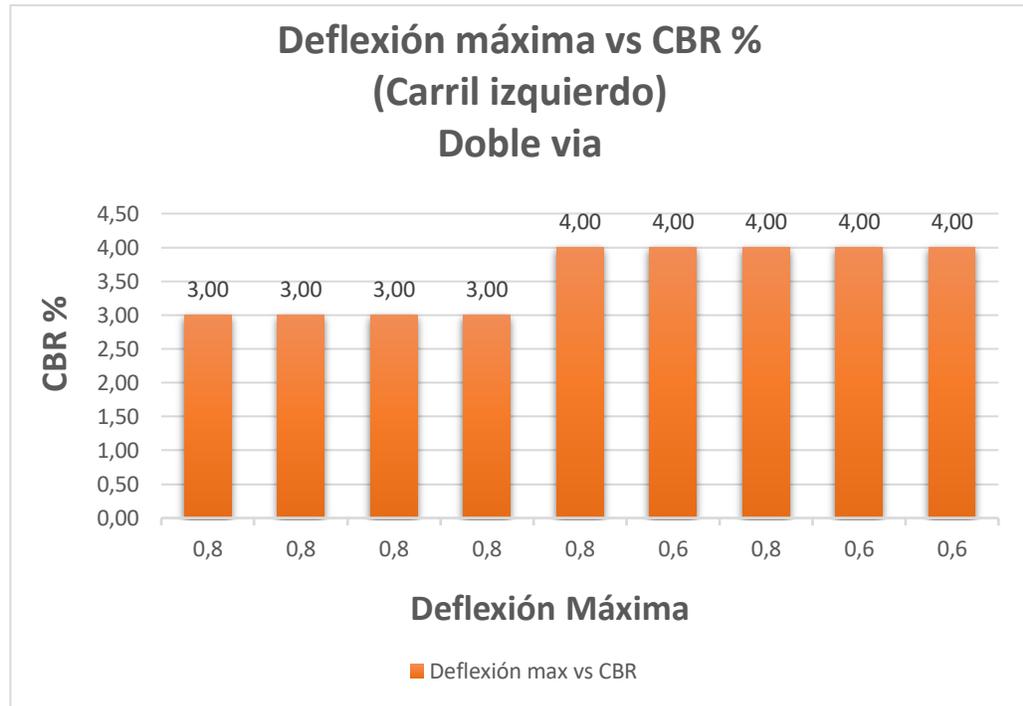
Gráfica 39: Deflexión vs CBR



Fuente: Elaboración propia

- En la gráfica, que representa al carril derecho de la doble vía, se puede observar que las deflexiones más altas se encuentran en los segmentos 1, 2 y 7 con valores de 0,80 mm y las menores en los segmentos 3, 4, 5, 6 y 8 con valores de 0,60 mm en todos los segmentos.
- Los CBR más altos se encuentran en los segmentos 3, 4, 5, 6, 7 y 8 con valores de 4 (%) en todos los segmentos y los menores en los segmentos 1 y 2 con valores de 3 (%)

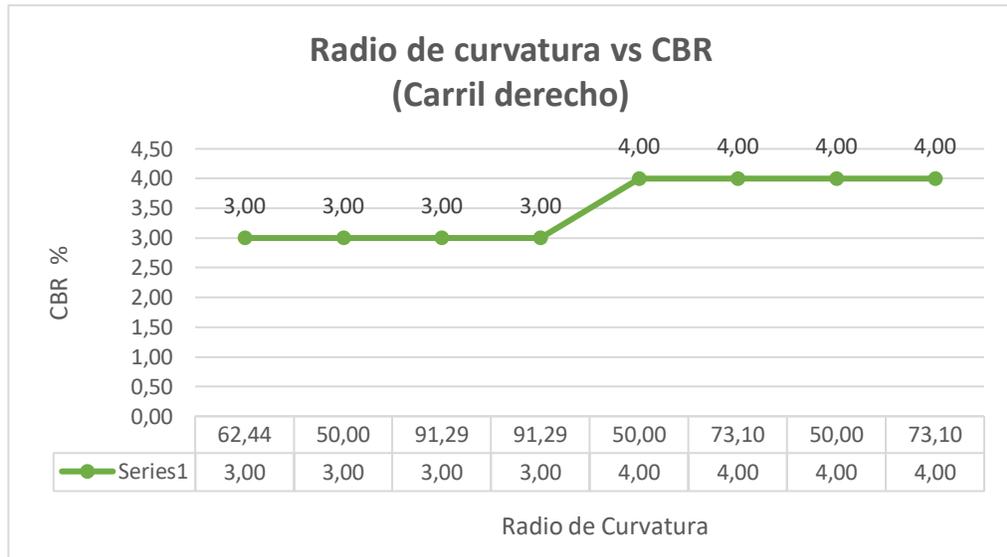
Gráfica 40: Deflexión vs CBR



Fuente: Elaboración propia

- En la gráfica, que representa al carril izquierdo de la doble vía, se puede observar que las deflexiones más altas se encuentran en los segmentos 1, 2, 3, 4, 5, y 7 con valores de 0,80 mm y las menores en los segmentos 6, 8 y 9 con valores de 0,60 mm en ambos segmentos.
- Los CBR más altos se encuentran en los segmentos 5, 6, 7, 8 y 9 con valores de 4 (%) respectivamente y los menores en los segmentos 1, 2, 3 y 4 con valores de 3 (%)

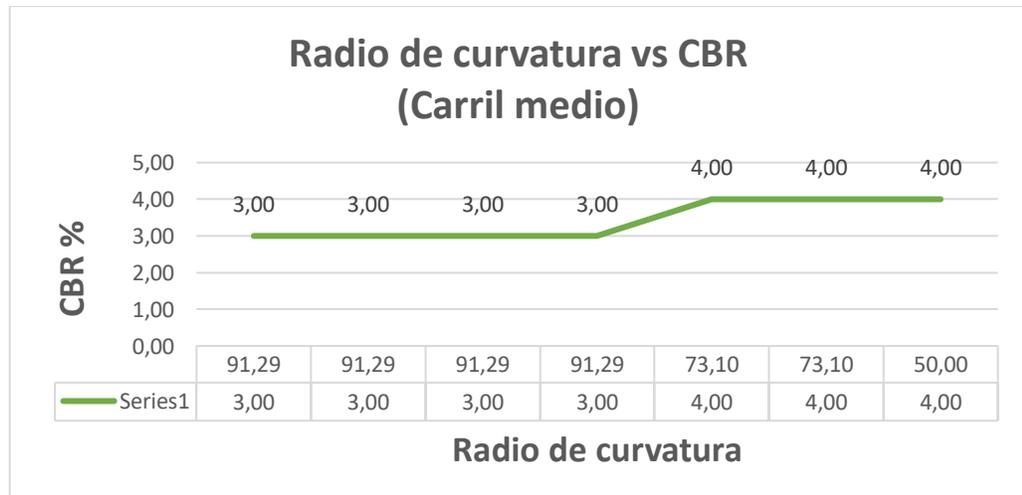
Gráfica 41: Radio de curvatura vs CBR



Fuente: Elaboración propia

- Se puede observar que en los segmentos 3 y 4 los radios de curvatura son más altos con un valor de 91,29 m. pero a su vez tienen CBR del 3% y las que se encuentran en los segmentos 5 y 7 son de 50 m. con un CBR de 4%

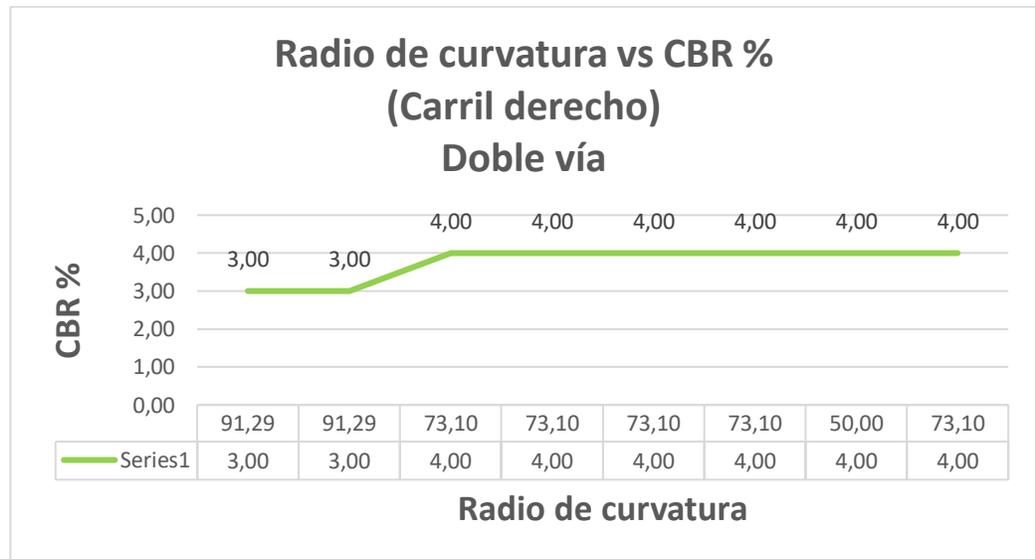
Gráfica 42: Radio de curvatura vs CBR



Fuente: Elaboración propia

- Se observa que en los segmentos 5, 6 y 7 los radios de curvatura son más bajos con valores de 73,10 m y 50 m. respectivamente, obteniendo un CBR de 4% y en los segmentos 1, 2, 3 y 4 se encuentran datos de 91,29 m. y CBR del 3%.

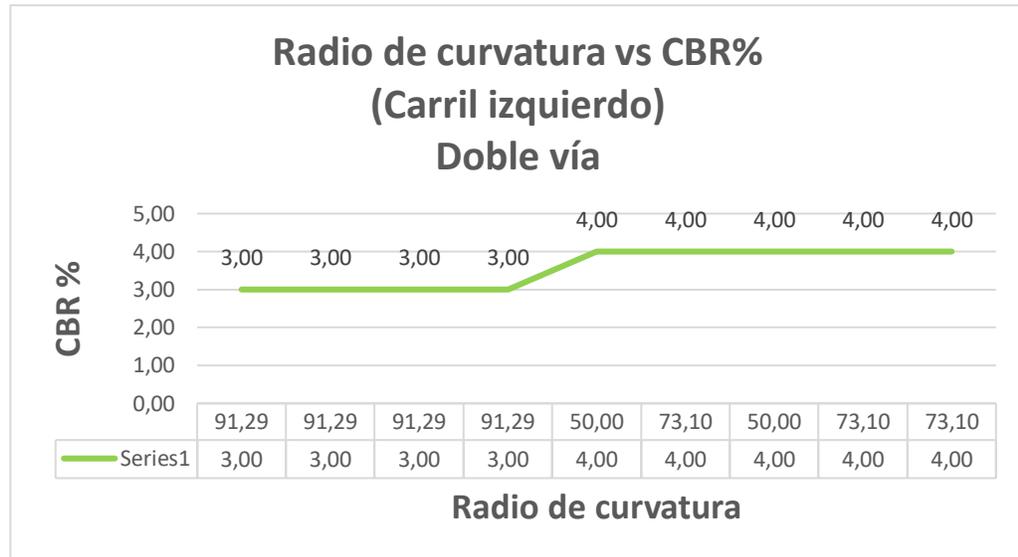
Gráfica 43: Radio de curvatura vs CBR



Fuente: Elaboración propia

- Se puede observar que en los segmentos 3, 4, 5, 6, 7 y 8 los radios de curvatura son más bajos con valores de 73,10 m. y 50 m. respectivamente, obteniendo en estos puntos los CBR más altos de 4% que las que se encuentra en el segmento 1 y 2 que tienen datos de radio de curvatura de 91,29 m, encontrándose con un CBR 3%

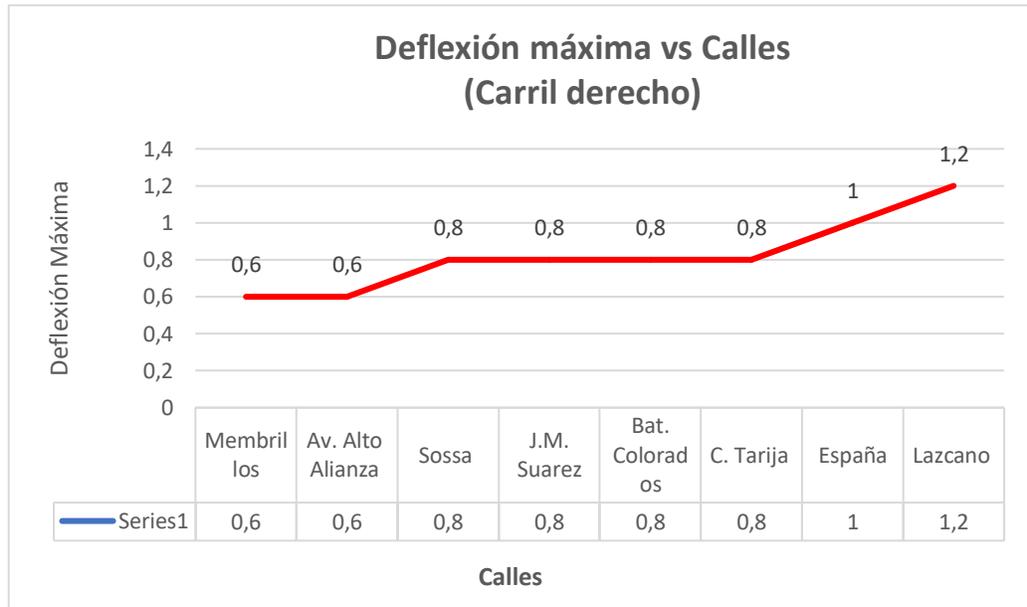
Gráfica 44: Radio de curvatura vs CBR



Fuente: Elaboración propia

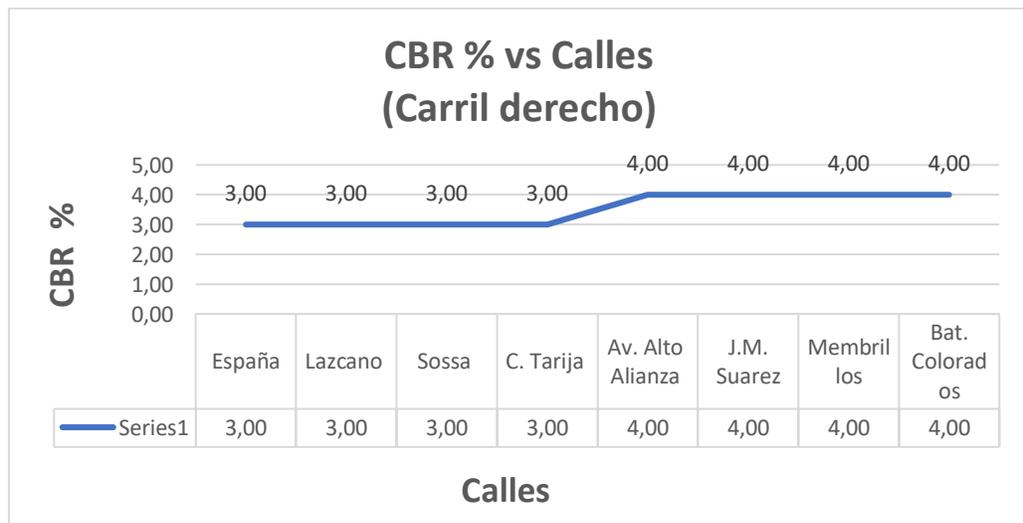
- En este carril que pertenece al carril izquierdo de la doble vía, los segmentos 5 y 7 tienen un radio de curvatura de 50 m. y un valor de CBR de 4 % respectivamente, por lo tanto, el valor del radio de curvatura no influye en los datos del CBR obtenido.
- Se puede observar que en los segmentos 1, 2, 3 y 4 los radios de curvatura son más altos con un valor de 91,29 m. con un CBR de 3% y los que se encuentran en los segmentos 6, 8 y 9 tienen 73,10 m de radio de curvatura con un CBR del 4 %.

Gráfica 45: Deflexión vs calles



Fuente: Elaboración propia

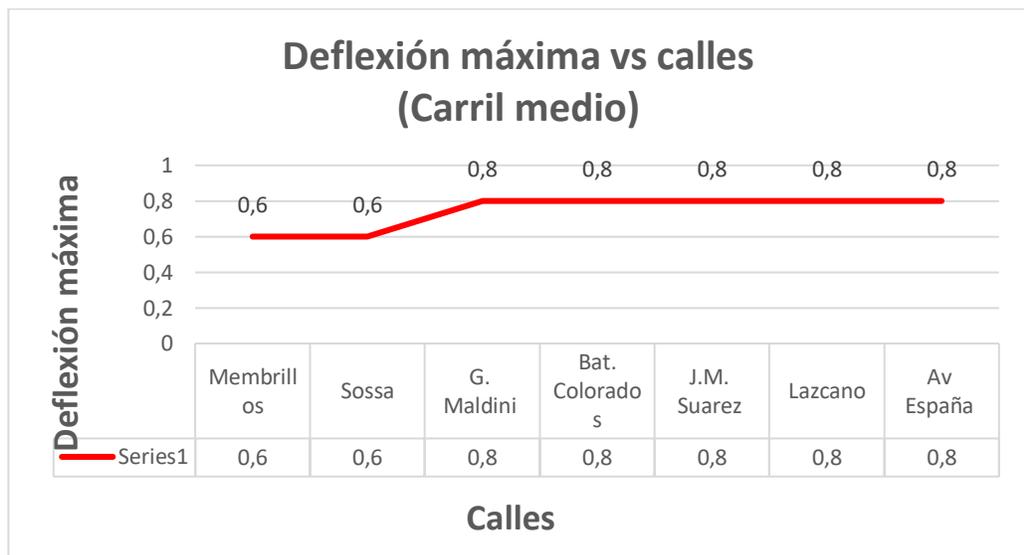
Gráfica 46: CBR vs calles



Fuente: Elaboración propia

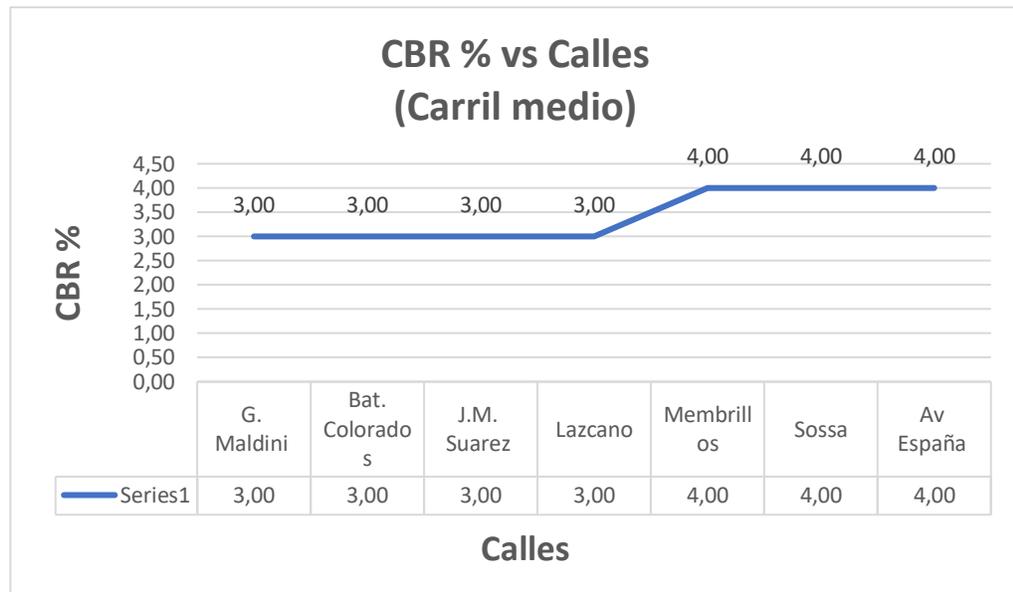
- Estas gráficas pertenecen al carril derecho, comenzando por las calles España, Lazcano, Sossa, J.M. Suarez, Batallón Colorados, y Tarija son las que presentan mayores deflexiones de 1, 1,2 y 0,8 mm respectivamente, por lo tanto, las mismas presentan los CBR más bajos de 3 %.
- En las calles Membrillos y Alto Alianza la deflexión es de 0,6 mm por lo tanto el CBR es del 3 y 4 %.
- Estas graficas están representadas en orden ascendente con los datos debidamente ordenados de menor a mayor.

Gráfica 47: Deflexión vs calles



Fuente: Elaboración propia

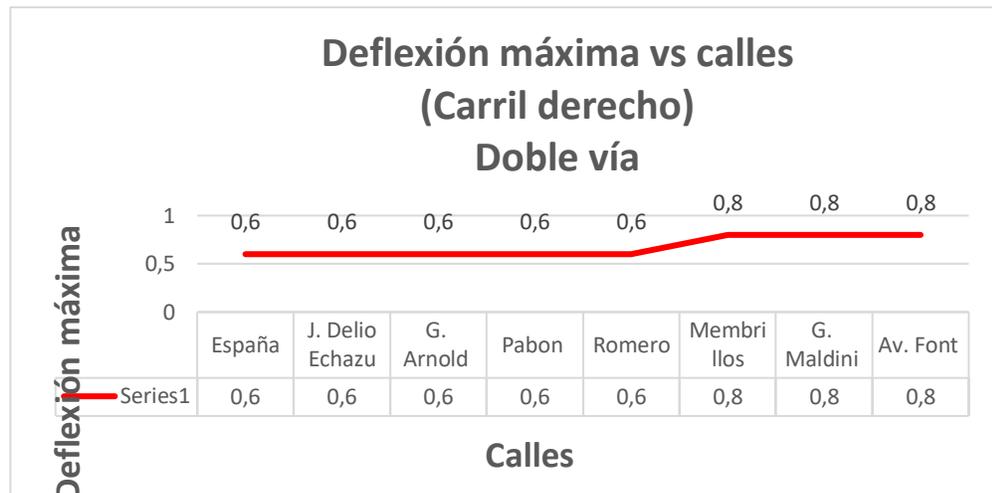
Gráfica 48: CBR vs calles



Fuente: Elaboración propia

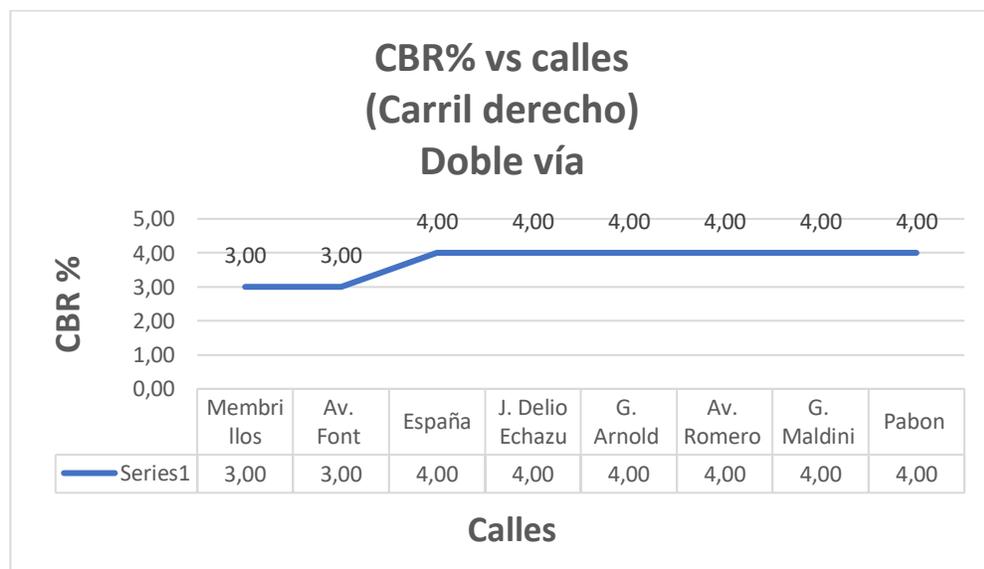
- Estas gráficas pertenecen a los cálculos del carril del medio, las calles Membrillos y Sossa cuentan con las deflexiones más bajas de 0,6 mm, sus CBR son de 4% respectivamente.
- Las deflexiones más altas se encuentran en las calles Maldini, Batallón Colorados, J.M Suarez, Lazcano y España, todas con el 0,8 mm respectivamente, las cuales cuentan con un CBR de 3 y 4 % respectivamente.

Gráfica 49: Deflexión vs calles



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 50: CBR vs calles

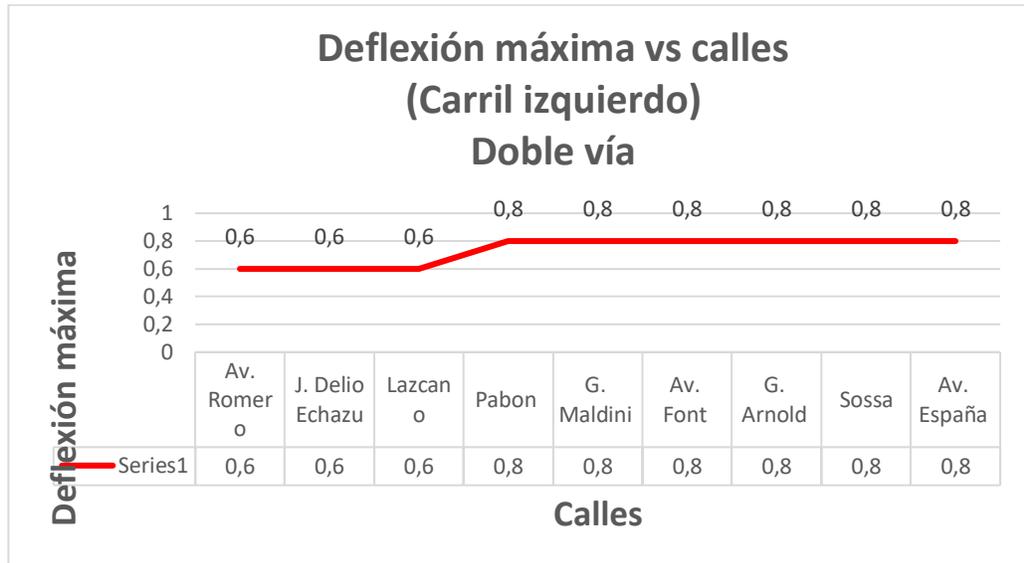


Fuente: Elaboración propia

- De igual manera sucede en el carril derecho de la doble vía en las calles España, J. Delio Echazú, G. Arnold, Romero y Pabón tienen una deflexión de 0,6 mm por lo tanto el CBR es del 4% respectivamente.

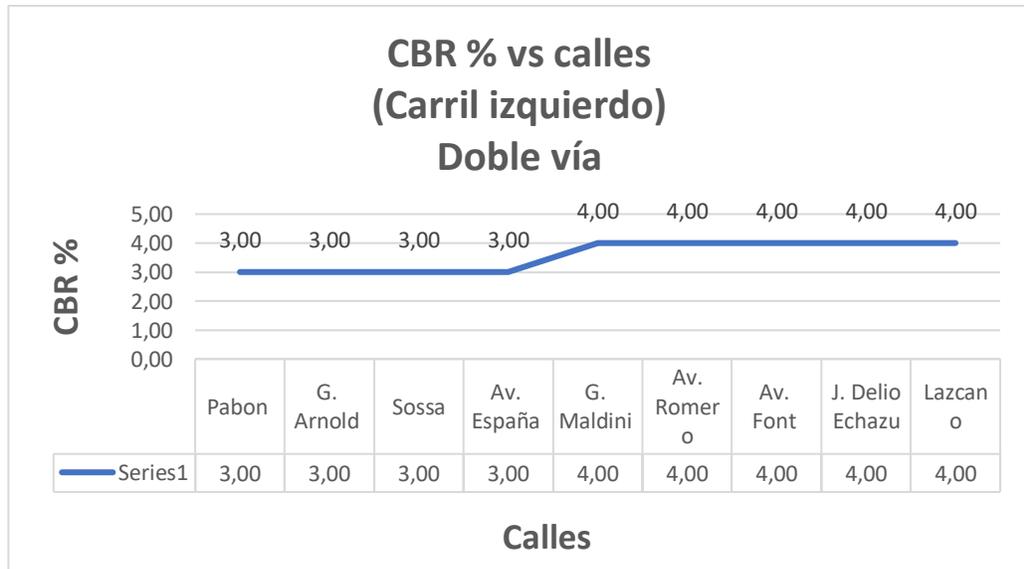
- En las calles Membrillos, Av Font y Maldini se presentan las deflexiones más altas con 0,8 mm, las cuales tienen un CBR de 3 y 4 % respectivamente.

Gráfica 51: Deflexión vs calles



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 52: CBR vs calles



Fuente: Elaboración propia

- En las calles Romero, J. Delio Echazu y Lazcano se presenta la deflexión más baja que es de 0,6 mm, las cuales cuentan con un CBR es del 4% respectivamente, siendo así su valor más alto.
- Las deflexiones más altas se encuentran en mayor cantidad en este tramo, en las calles Pabón, Maldini, Font, G. Arnold, Sossa y Av. España con 0,8 mm en todas las calles, por lo tanto, las mismas tiene un CBR de 3 %.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones presentadas a continuación fueron realizadas tras finalizar este trabajo, el cual está basado en el “ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO DE SUBRASANTES DE BAJA CAPACIDAD PORTANTE POR CORRELACIÓN DEFLECTOMÉTRICA EN PAVIMENTOS FLEXIBLES” a través del MÉTODO HOGG.

- El ensayo de deflectometría no es complejo y es muy práctico en su resolución, se observó que las deflexiones máximas en nuestra zona de estudio están entre 0,6 hasta 1,2 mm. llegando a la conclusión que en distintas calles se realizó alguna reestructuración debido a la circulación de todo tipo de vehículos.
- A su vez el CBR varía en función de las deflexiones, es decir a mayor deflexión existe un CBR más bajo, por lo tanto, si existe menor deflexión, se tiene mayor CBR. Los datos que obtuvimos en el tramo de estudio oscilan entre 3 a 4 %.
- El radio de curvatura del área en estudio varía entre 50 a 91,29 y estos resultados no influyen en los CBR obtenidos. No se espera una correlación perfecta entre el radio de curvatura y el CBR, ya que existe una variación que está incidiendo más por la deflexión.
- Para la realización de la práctica se debe considerar algunos factores como ser la temperatura, la humedad y el viento, ya que estos aspectos tienen gran influencia en los datos obtenidos, por lo tanto, el resultado final de la obtención del CBR del tramo en estudio, será la consecuencia de una correcta medición de deflexiones en las capas correspondientes y una adecuada calibración del equipo.
- Como referencia, Tarija cuenta con tres zonas de clasificación cualitativa del suelo:
 1. Zona A: CBR > 10 % Desde el Mercado campesino hasta la calle Campero.
 2. Zona B: CBR 5 – 10 % Desde la calle Campero hasta la calle O’Connor.

3. Zona C: CBR < 5 % Desde la calle O'Connor hasta el barrio Morros Blancos.

El área del proyecto en estudio se encuentra ubicado en parte del barrio el Tejar, San Gerónimo y Aeropuerto, por lo tanto, pertenece a la Zona C, los valores obtenidos se encuentran en ese rango.

- Si bien los datos no coinciden con los valores obtenidos del proyecto de la empresa INCOTAR, se mantienen dentro del rango.

Tabla 17: Tabla comparativa de resultados de CBR

Carril	CBR calculado	Datos CBR Proyecto INCOTAR
Carril derecho	3,00	3,8
	3,00	
	3,00	
	4,00	
	4,00	
	4,00	
	4,00	
	3,00	
Carril Medio	3,00	3,4
	3,00	
	4,00	
	3,00	
	4,00	
	3,00	
	4,00	
	4,00	
Doble Vía derecho	4,00	3,3
	3,00	
	4,00	
	4,00	
	3,00	
	4,00	
	4,00	
	4,00	
Doble Vía izquierdo	3,00	3,3
	4,00	

4,00
4,00
3,00
4,00
3,00
4,00
3,00

Fuente: Elaboración propia

- Al realizar los ensayos de caracterización con el suelo obtenido del tramo en estudio, se obtuvo un CBR inicial de 2,02 %, el cual según la clasificación de la tabla 2 clasificación y usos del suelo de acuerdo a los valores CBR, se trata de una subrasante mala, por lo tanto, se puede evidenciar que la misma tuvo un mejoramiento antes de su construcción.

4.2 RECOMENDACIONES

Se pudo observar al momento de realizar el ensayo una variación de lecturas en las deformaciones, esta variación puede deberse a diferentes factores, para los cuales se debe tomar precauciones en el manejo y uso de la viga Benkelman debido a que este aparato es muy sensible al movimiento.

Es necesario contar con al menos 3 operadores, tanto para darle indicaciones al conductor del camión, para leer los datos obtenidos y para tabular los mismos. En mi caso requerí el apoyo de más personas, esto debido a que es una zona transitada, pese a que se realizó el ensayo en horas de la madrugada; necesitábamos cerrar las calles tratando de no perjudicar a los conductores en su trayecto o en su caso esperar que se alejen lo suficiente para proceder con la medición.

El operador de la viga debe tener mucha experiencia en el uso de ésta y permanecer atento a las lecturas porque en ocasiones el camión avanza rápido y se torna complicado la lectura a distancias cortas, también así el conductor del camión debe ser previamente capacitado para no volver a repetir las mediciones.

La viga Benkelman debe ser usada en terrenos planos para obtener lecturas satisfactorias, no se logran las mismas cuando la viga está situada en curvas verticales, cuando hay grandes velocidades de viento, baches o existe humedad en la superficie. Se debe tener la viga Benkelman perpendicular al eje trasero del camión y paralela a las ruedas en forma recta.