

CAPITULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Una obra vial bien desarrollada en las etapas de planificación, ejecución y mantenimiento; genera una mayor velocidad de desplazamiento de los usuarios, menos daños a los vehículos y por ende baja contaminación ambiental. Lo que se traduce en menos accidentes vehiculares y más empuje económico en las zonas por donde cruza la vía.

Por consiguiente, en su periodo de servicio el pavimento se deteriora gradualmente debido a las variaciones de temperatura, humedad y cargas provocadas por los vehículos, presentando deficiencias funcionales y estructurales que reducen el nivel de servicio, por lo tanto, es necesario efectuar evaluaciones que identifiquen las fallas presentadas en el pavimento y optar por una solución o tratamiento de este.

Por otra parte, aplicar evaluaciones destructivas, originan a futuro fallas considerables. Justamente ante la problemática, A.H.A. Hogg, determina un modelo matemático para determinar parámetros estructurales importantes al momento de aplicar un tipo de conservación vial, como es el recapamiento.

Hogg, toma datos de una práctica de evaluación no destructiva como es el ensayo con la Viga Benkelman, y a través de otros factores importantes a las deflexiones que se generan con la carga vehicular, determina un modelo matemático aplicable directamente a pavimentos flexibles y que trae consigo buenos resultados. A diferencia de los cálculos de la Viga Benkelman, que determina las deflexiones máximas y radios de curvatura ante una carga de 8,2 toneladas, el Modelo de Hogg, determina el módulo de elasticidad y el valor de CBR de la capa subrasante, y permite determinar el espesor del recapamiento del pavimento, según necesidad.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente en nuestro medio, se realizaron estudios de evaluaciones superficiales y estructurales aplicando muchas técnicas. Para las evaluaciones estructurales, se enfocaron en realizar por dos métodos, el destructivo a través de la extracción de núcleos y el no destructivo usando la Viga Benkelman.

Sin embargo, recabando información de las tesis realizadas en nuestra universidad, las evaluaciones realizadas con Viga Benkelman, sólo determinan valores de Deflexión máxima y Radios de Curvatura, las cuales son comparadas con los valores característicos que determina la norma, para ver si cumple o no.

En el presente trabajo, se pretende aplicar el Modelo de Hogg que se basa en un modelo matemático determinado por el Método Racional. Aplicando la no destrucción del pavimento, Hogg, toma los datos que se obtienen del pavimento en estudio con datos tomados por la Viga Benkelman, para determinar parámetros más relevantes a una evaluación estructural, esos parámetros son: módulo de elasticidad y valor CBR de la subrasante, y el refuerzo estructural que necesita el pavimento.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. Situación Problemática

Actualmente en nuestro medio, los tramos carreteros no son evaluados adecuadamente para definir acciones preventivas antes el deterioro del paquete estructural o alargar la vida útil del pavimento. Por eso ante esta situación Hogg propone una alternativa matemática para definir cuan bien está el pavimento y si es necesario o no, un recapamiento, a partir de valores de modelo de elasticidad y CBR de la capa base que son determinados de forma no destructiva con el equipo viga Benkelman.

Por otra parte, revisando la bibliografía de estudios realizados en nuestra universidad, en ninguno de ellos, determinan valores de modelos de elasticidad y CBR con datos obtenidos con la viga Benkelman, porque solo se enfocan en determinar las deformaciones máximas y radios de curvatura que luego son comparados con la norma para ver si están dentro de los parámetros establecidos.

1.3.2. El problema

¿Cómo aplico el Modelo matemático de Hogg, para determinar el refuerzo estructural de un pavimento flexible?

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Aplicar el modelo de Hogg, usando valores obtenidos con la viga Benkelman para determinar el diseño del refuerzo estructural de un pavimento flexible.

1.4.2. Objetivos específicos

- ❖ Recopilar información del tramo en estudio, necesario para introducir al modelo de Hogg.
- ❖ Realizar en campo la práctica con la viga Benkelman para obtener datos de los puntos del tramo en estudio.
- ❖ Determinar el módulo de elasticidad y CBR de la subrasante.
- ❖ Realizar un análisis estadístico para determinar la confiabilidad de los resultados.
- ❖ Determinar el refuerzo estructural necesario de cada punto del tramo en estudio.
- ❖ Determinar el costo del refuerzo estructural.
- ❖ Describir conclusiones y recomendaciones según resultados obtenidos.

1.5. HIPÓTESIS

Con el modelo matemático de Hogg es posible calcular el módulo de elasticidad, el CBR y el refuerzo estructural de la subrasante usando datos de deformación de pavimento flexible que proporciona la Viga Benkelman; de tal manera que se pueda determinar el grado de confiabilidad comparando los datos de CBR_{Hogg} con el $CBR_{Laboratorio}$.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Variable independiente

- ❖ Deformaciones del pavimento flexible según datos de viga Benkelman.
- ❖ Capacidad portante de la subrasante $CBR_{Laboratorio}$.

1.6.2. Variables dependientes

- ❖ Propiedades de la subrasante para el modelo de Hogg: Módulo de elasticidad de la subrasante, Capacidad portante de la subrasante (CBR_{Hogg}) y Refuerzo estructural.

Tabla 1.1. Cuadro de operación de variables

| Variable | Indicador | Conceptualización | Medición | Rango de Variabilidad |
|---|--|---|--------------------|-----------------------|
| Variable Independiente: X1 = Deformación del pavimento | Deflexión | Deflexión máxima que se genera con la carga de una llanta trasera de un camión con peso de 8,2 ton. | mm | (0 - 5) |
| | Radio de curvatura | Radio de curvatura que genera la deflexión máxima. | m | 80 mín. |
| X2 = $CBR_{Laboratorio}$ | Capacidad portante de la subrasante | Se determina el CBR en laboratorio de manera física y mecánica | % | (3 – 35) |
| Variable Dependiente: Y = Propiedades de la subrasante según Hogg | Módulo de elasticidad de la subrasante (E) | El módulo de elasticidad se refiere a la capacidad de recuperación de la capa de suelo. | Kg/cm ² | (850 – 2000) |
| | Capacidad portante de la subrasante (CBR) | Es la resistencia de un suelo respecto a otra estándar (roca), generada por la carga vehicular. | % | (3 – 35) |
| | Refuerzo estructural | Es el espesor que se dará al recapamiento en función del módulo de elasticidad y CBR. | cm | 3 - 10 |

Fuente: Elaboración propia.

1.7. DISEÑO METODOLÓGICO

Unidades de estudio y decisión muestral

1.7.1. Unidades de estudio

Pavimento flexible.

1.7.2. Población

Paquete estructural de pavimento flexible.

1.7.3. Muestra

Paquete estructural del tramo San Mateo – Sella Méndez.

1.7.4. Muestreo

El muestreo de datos del tramo San Mateo – Sella Méndez con 5 km de longitud, se realizará cada 200 metros, es decir 5 puntos por kilómetro, o 26 puntos por el tramo de ida, lo mismo se realizará en el tramo de vuelta, haciendo un total de muestras de 52 puntos de lectura usando la viga Benkelman.

1.7.5. Métodos y técnicas empleadas

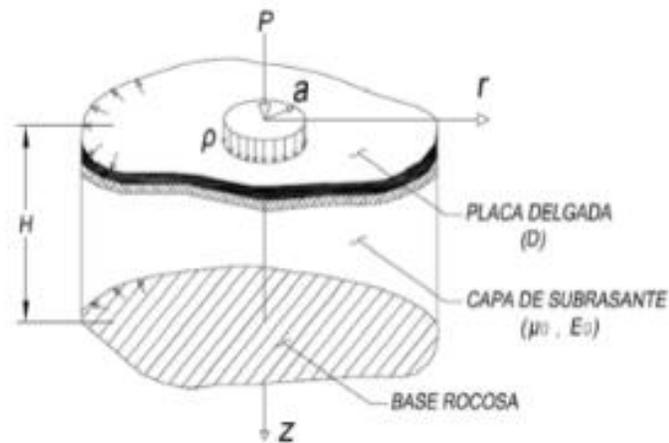
Los métodos y técnicas empleadas, se describen a continuación:

1.7.5.1. Método del modelo matemático de Hogg

En el año 1944, A.H.A Hogg presentó una solución matemática del modelo que se conoce por su nombre. Este modelo es una extensión del modelo bicapa y cuya solución radica en desarrollar la ecuación diferencial en derivadas parciales que modela un pavimento.

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).

Figura 1.1. Representación modelo Hogg



Fuente: Elaboración propia.

1.7.5.2. Técnicas de muestreo y herramientas

Se aplicó un muestreo probabilístico simple, cada 200 m, donde se tiene que evaluar 26 puntos de ida y 26 puntos de vuelta, haciendo un total de 52 puntos para todo el estudio.

El estudio se realizará con la viga de viga Benkelman y el equipo consta de los siguientes partes:

El deflectómetro Benkelman es completamente mecánico y funciona como palanca.

La viga comprende dos partes:

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

Figura 1.2. Viga Benkelman



Fuente: Elaboración propia

1.8. PROCEDIMIENTOS DE APLICACIÓN

La Viga Benkelman se utiliza colocando la viga sobre el pavimento a evaluar y someténdola a una carga mediante un peso de 8,2 toneladas de los 2/3 del eje trasero de una volqueta. Se realizan mediciones de deflexión en diferentes puntos de la viga y se registran los resultados, como se observa en la siguiente figura:

Figura 1.3. Procedimiento de ensayo



Fuente: Elaboración propia

1.8.1. Preparación previa para la aplicación de instrumentos

Para poder realizar el estudio en el tramo, es necesario contar previamente con los permisos de las autoridades que están a cargo del tramo carretero, en este caso la ABC. Así también, al momento de realizar el ensayo se tiene que prever una volqueta cargada cuyo 2/3 del eje trasero debe pesar 8,2 toneladas, con una presión de inflado de las llantas de 82 psi.

1.8.2. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información

El tipo de estudio para el procedimiento de análisis y de interpretación es tipo descriptivo, porque permitirá conocer las condiciones reales del tramo carretero en estudio.

1.8.3. Procedimiento para el análisis

Una vez que se obtengan los datos de campo con la viga Benkelman, se puede analizar e interpretar la información obtenida, para esto se utilizará programas de cálculo como la hoja Excel, donde se realizarán tablas con fórmulas del modelo matemático de Hogg permitiendo así determinar el estado actual del pavimento flexible del tramo San Mateo – Sella Méndez.

1.8.4. Interpretación de la información

Concluida la tabulación de los datos se obtendrán los resultados finales, y se hará una interpretación de éstos por progresiva, por carril y por todo el tramo, es decir un análisis de los módulos de elasticidad, CBR y el refuerzo estructural obtenidos. Así también se recomendarán algunas alternativas de reparación para zonas con falla estructural.

1.9. ALCANCE DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación pretende ofrecer la información básica y fundamental para el desarrollo de la evaluación de un tramo vial, aplicando el modelo matemático de Hogg, para determinar valores estructurales como son el módulo de elasticidad de la subrasante, CBR y el refuerzo estructural del tramo.

El tramo estudiado en la presente investigación es de San Mateo - Sella Méndez, con una longitud total de 5 Km. El estudio se realizará en los carriles de ida y de vuelta, haciendo una longitud total de evaluación de 10 Km.

Para determinar los parámetros necesarios que exige el modelo matemático de Hogg, se hará un estudio en el tramo usando el equipo Viga Benkelman, con lecturas cada 200 metros, es decir 26 puntos por carril, haciendo un total de 52 puntos en estudio.

CAPÍTULO II

APLICACIÓN DEL MODELO DE HOGG EN PAVIMENTOS

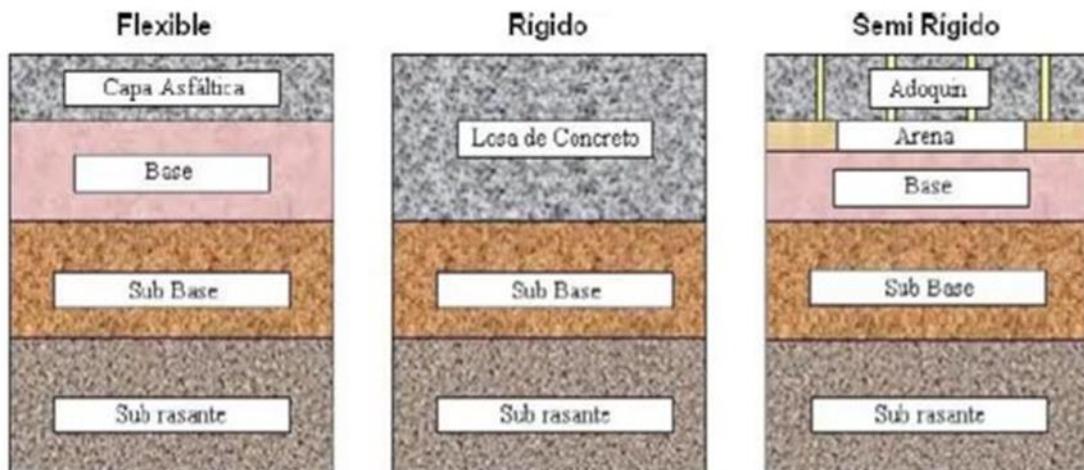
CAPÍTULO II

APLICACIÓN DEL MODELO DE HOGG EN PAVIMENTOS

2.1. PAVIMENTO

Según (AASTHO, 1993), se define el pavimento por la perspectiva del usuario y el criterio ingenieril; en cuanto al usuario el pavimento debe ser una superficie que brinde un servicio de calidad y seguridad cuando se circule por ella, por otro lado para la ingeniería es un conjunto de capas que conforman un paquete estructural de espesores diferentes, diseñado para soportar los esfuerzos destructivos del tránsito, la intemperie y de agua, así como abrasiones y punzonamientos (esfuerzos cortantes) producidos por los vehículos y el paso de personas para luego transmitirlas la subrasante. Existen tipos de pavimentos como los mostrados en la figura 1. (Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

Figura 2.1. Estructura de un pavimento.



Fuente: Obtenida de google

2.1.1. Pavimento flexible

El presente proyecto de investigación está basado en los pavimentos flexibles, por lo que se define a detalle las capas que lo constituyen (carpeta asfáltica, base, subbase y Subrasante) además de su comportamiento frente a sollicitaciones externas.

a) Carpeta asfáltica

Es la capa superior del pavimento flexible, la cual es elaborada con agregados pétreos clasificados adicionando un ligante asfáltico (cemento asfáltico o emulsiones asfálticas), esta debe ser dosificada en un óptimo contenido para garantizar la estabilidad de la carpeta logrando una superficie uniforme, impermeabilizarla para evitar la infiltración de agua y resistente para soportar los esfuerzos producidos por las cargas aplicadas.

Así pues, para asegurar una performance de calidad se le debe realizar un mantenimiento periódico. (Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

b) Capa Base

Está conformada por material granular (piedra chancada y mezcla natural de agregado-suelo), también se le puede adicionar materiales bituminosos, cal y cemento portland formando una base estabilizada; Se encuentra debajo de la carpeta asfáltica y transfiere los esfuerzos generados por los vehículos a las capas inferiores. (Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

c) Capa Sub Base

Está constituida por materiales de menor calidad sirviendo de apoyo a la capa base, además de cumplir como una transición actuando de filtro entre la capa base y subrasante impidiendo que los finos ingresen a la capa superior y la dañen estructuralmente, así como también absorbe los cambios volumétricos producidos en la subrasante debido a la humedad y cambios de temperatura, consecuentemente transmite los esfuerzos a la subrasante. (Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

d) Capa Sub Rasante

Es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en el terreno natural, que sostiene la estructura del pavimento, y está conformada por suelos seleccionados de características aceptables y compactados por capas para

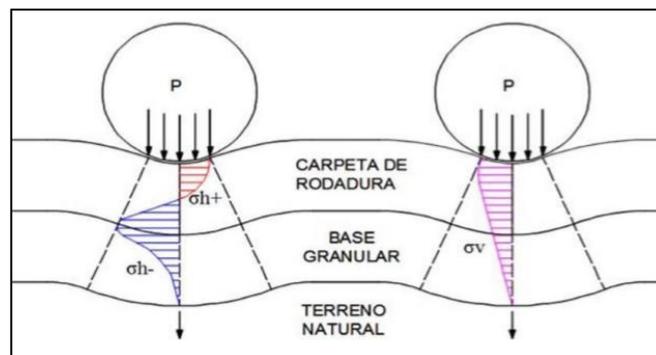
construir un cuerpo estable en perfecto estado, de tal manera que no se vea afectada por la carga de diseño que proviene de los vehículos.

Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con los vehículos y las características de los materiales de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño de la estructura del pavimento que se colocara encima. (Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

2.1.2. Esfuerzos producidos en un pavimento

Cuando un vehículo transita por la vía la carga de este es transmitida al pavimento de estructura típica, por medio de sus llantas generando esfuerzos horizontales y verticales, por lo tanto, la carpeta asfáltica es la encargada de absorber y los esfuerzos verticales y esparcirlos en su fibra interior pasándolos de positivos a negativos. La figura 2, muestra la distribución de esfuerzos horizontales (σ_h) y verticales (σ_v) de pavimentos típicos. (Minaya Gonzales & Ordoñez Huaman. 2006), en su publicación “Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos” modelaron una estructura típica de pavimento flexible sobre una subrasante débil variando el espesor de la carpeta asfáltica entre 2, 4 y 6 pulgadas, como alternativa de disminuir los esfuerzos de tracción, concluyendo que el espesor de la carpeta asfáltica no reduce las deformaciones por tracción, y que la mejor opción es realizar una estabilización a nivel de terreno de fundación puesto que las fallas reflejadas en el pavimento tienen origen en la subrasante. (Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

Figura 2.2. Distribución de esfuerzos en un pavimento flexible



Fuente: Minaya Gonzales & Ordoñez Huaman. (2006)

2.1.3. Falla estructural

Son originadas por los defectos presentados en las capas que conforman la estructura del pavimento, puesto que estas deben resistir, transmitir y disminuir los esfuerzos de las cargas vehiculares hacia la subrasante en valores mínimos.

Cuando ocurren este tipo de fallas la capacidad de carga del pavimento disminuye y en su etapa más avanzada llega a generar una obstrucción total del pavimento. Las dos causas fundamentales:

Cuando la capacidad de deformación – recuperación de los materiales que conforman la estructura de pavimento es excedida más allá del valor que determinan las deformaciones recuperables por elasticidad instantánea y retardada, desarrollándose deformaciones permanentes (ahuellamiento) en cada aplicación de las cargas, las que se acumulan, modificando los perfiles de la calzada hasta valores que resultan intolerables para la comodidad, seguridad y rapidez del tránsito y que puede provocar el colapso de la estructura.

Cuando las deformaciones recuperables son elevadas, los materiales y en particular las capas asfálticas sufren el fenómeno denominado fatiga cuando el número de aplicaciones de las cargas pesadas es elevado, que se traduce en reducción de sus características mecánicas. En este caso la deformación horizontal por tracción en la parte inferior de las capas asfálticas al flexionar la estructura, puede exceder el límite crítico y se llega a la iniciación del proceso de fisuramiento. (Carahuatay Chávez, 2015, pp18-19)

2.1.4. Evaluación estructural de pavimentos

Se refiere a la determinación de la capacidad de soporte de una estructura vial, esta evaluación puede realizarse en cualquier momento del periodo de servicio de la misma obteniendo datos que permiten cuantificar las necesidades de rehabilitación. Generalmente, ante un problema estructural habitualmente se realiza una evaluación por procedimiento “destrutivo” excavando calicatas a cielo abierto para tomar muestras representativas y ser procesadas en laboratorio analizando sus materiales

individualmente y luego deducir sus características estructurales, sin embargo, existe un método “no destructivo” que consiste en tomar deflexiones a nivel de superficie de pavimento, esta metodología se basa en la interpretación cuantitativa que guarda la curva de deflexiones, para luego ser comparado el sistema pavimento-subrasante con un modelo matemático, este proceso es conocido como diseño inverso, puesto que utiliza la respuesta del sistema pavimento subrasante para establecer sus características estructurales. (Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

2.1.4.1. Evaluación estructural No Destructiva

También llamados métodos indirectos de auscultación estructural, mediante los cuales se puede evaluar la capacidad estructural para soportar las cargas producidas por el tránsito en los distintos componentes que conforman el pavimento, esto sin la necesidad de perturbar o destruirlos, para realizarla se deben tomar mediciones en la superficie del pavimento, el cual al aplicar una fuerza externa o transmisión de energía desarrolla una respuesta que son conocidas como las deflexiones las cuales son interpretadas por su forma y dimensión del cuenco de deflexiones desarrollado, y a través de un modelo matemático se logra determinar las características estructurales del pavimento.

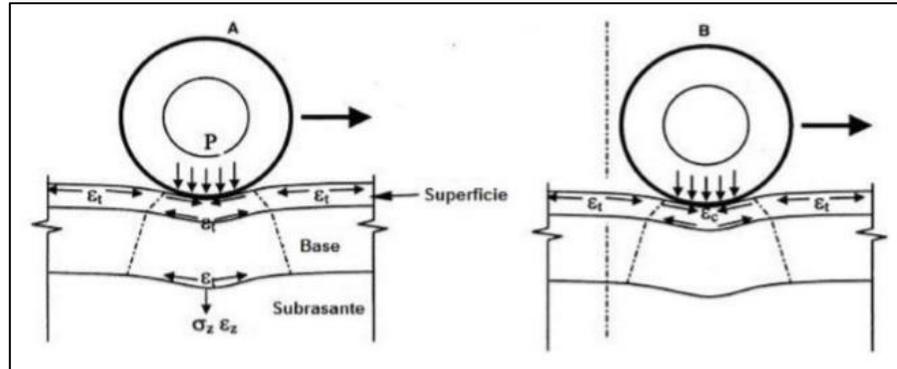
El cuenco de deflexiones puede ser definido, tras la caracterización mediciones realizadas en varios puntos del pavimento por un equipo deflectométrico. (Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

2.1.4.2. Deflectometría

Para conocer la capacidad estructural del pavimento, se puede realizar utilizando un método fácil y sencillo el cual consiste en aplicar una carga a la superficie de rodadura y medir las deflexiones.

La deflexión en los pavimentos representa la respuesta de los mismos ante un estímulo, que vendrían a hacer las cargas de tráfico. Se puede definir también como la deformación vertical bajo el punto de aplicación de la carga.

Figura 2.3. Esquema de deflexión en el pavimento flexible ante la carga vehicular



Fuente: Reyes Lizcano. (2003)

Dependiendo de la estructura de pavimento, la subrasante contribuye entre un 70% a 95% de la deflexión medida en la superficie del pavimento, es decir que la mayor deflexión en el pavimento es causada por la compresión elástica de la subrasante.

También se debe tener en cuenta que la magnitud de la deformación en un material considerado en cualquier punto de la estructura del pavimento está directamente relacionada con el estado triaxial de esfuerzos, entendemos por esto que cuando decrecen los esfuerzos verticales de la subrasante, la deflexión decrece. Esto significa que al incrementarse los espesores de las capas superiores o incrementar su rigidez, la deflexión decrece.

Siendo la deflexión una medida de la respuesta estructural del conjunto pavimento subrasante frente a una determinada sollicitación de carga.

El análisis deflectométrico se puede utilizar para los siguientes fines:

Correlación entre los valores de deflexiones y la presencia o rápido desarrollo de fallas por fatiga y la posibilidad de establecer un rango de valores tolerables en relación al tránsito.

Análisis de la relación deterioro-fatiga usando procedimientos de cálculo regresivo.

Establecer estrategias de mantenimiento en los sistemas de gestión de pavimentos.

Como indicador para estimar la capacidad del soporte del pavimento para resistir las cargas de tráfico durante su vida útil.

Determinar los periodos críticos en que se origina un mayor deterioro del pavimento, basándose en la variación estacional de las deflexiones. (Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

2.1.4.3. Deflexiones Admisibles

La deflexión es un parámetro utilizado para la verificación de la capacidad estructural de un pavimento.

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

Las siguientes son algunas fórmulas empleadas para calcular la deflexión admisible:

De acuerdo con el criterio del Instituto del Asfalto.

$$D_{adm} = 25,64 N^{-0,2383}$$

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

$$D_{adm} = (1,15/ N)^{0,25}$$

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

$$D_{adm} = 6,237 N^{-0,165}$$

Donde:

N= ESAL (Numero de ejes equivalentes utilizados para el diseño de pavimento.)

Estas fórmulas por ser empíricas son muy sensibles a parámetros como el tráfico de la vía, espesor de carpeta asfáltica y características de los materiales y son de aplicación

para la zona y condiciones de carga bajo las cuales han sido desarrolladas. (Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

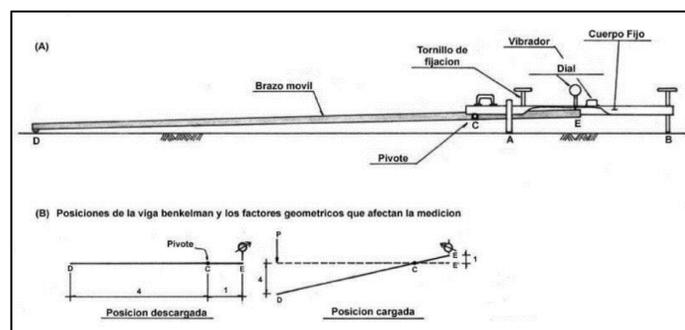
2.1.4.4. Deflexión estática con Viga Benkelman

En el año de 1953 se realizó el programa de ensayos viales de la AASHTO Road Test, donde el Ing. A.C Benkelman desarrollo un deflectómetro denominado la “Viga Benkelman”. La norma MTC E 1002, establece que:

El método consiste en medir la deformación producida en la superficie del pavimento por la aplicación de una carga normalizada, le dispositivo mecánico utilizado es la viga Benkelman de brazo simple o doble, equipo que mide los desplazamientos verticales de un pinto de contacto situado entre las ruedas duales del eje de carga, para una presión de inflado en los neumáticos de 80 psi y una carga de 8.2 t en el eje posterior del camión.

La viga consta 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. además de un brazo móvil acoplado al cuerpo fijo mediante una articulación de giro pivote C, uno de cuyos extremos se apoya sobre el terreno – punto D; y el otro se encuentra en contacto sensible con el vástago del dial de movimiento vertical – punto E. Adicionalmente cuenta con un vibrador incorporado, que evita que el indicador dial se trabe y/o cualquier interferencia exterior afecte las lecturas. (MTC E 1002, 2013, p.p. 962-963).

Figura 2.4. Partes de la viga Benkelman



Fuente: MTC E 1002. (2013)

La viga Benkelman de doble brazo con sus correspondientes diales (al 0.01 mm y recorrido de 12 mm) y las siguientes dimensiones:

Longitud del primer brazo (brazo largo), desde el pivote al punto de prueba es 2.44 m.

La longitud del primer brazo (brazo largo), desde el pivote al punto de apoyo del vástago del dial es 0.61 m.

Longitud del segundo brazo (brazo corto), desde el pivote al punto de prueba es 2.19 m.

Longitud del segundo brazo de ensayo, desde el pivote al punto de apoyo del vástago de su dial registrador 0.5475.

La única diferencia entre la viga Benkelman simple y de doble brazo, radica en el segundo brazo adicional (brazo corto), cuyo punto de apoyo sobre el terreno se encuentra a 25 cm de distancia del primer brazo (brazo largo).

Un camión para ensayo con las siguientes características, el eje trasero pesará en la balanza 8.2 toneladas, igualmente distribuidos en sus ruedas duales y estará equipado con llantas de caucho y cámaras neumáticas. Las llantas deberán ser 10" x 20", 12 lonas e inflada a 5.6 kg/cm² (80 libras por pulgada cuadrada). La distancia entre los puntos medios de la banda de rodamiento de ambas llantas de cada rueda dual debe ser de 32 cm.

Material adicional:

Reloj convencional con indicador de segundos.

Termómetro convencional o sistema de termopares con escala de -10 °C a 50 °C y precisión de 1°C.

Manómetro, que disponga de una boquilla adecuada para medir la presión de inflado.

Cinta métrica, de 25 m de longitud. Puede sustituirse con ventaja por una cinta métrica de bolsillo de 2 o 3 m de longitud.

Martillo y clavos de acero, o taladro, adecuados para practicar orificios en el pavimento hasta 5 cm de profundidad.

Cuña o calzo de parada, de chapa metálica o de madera.

Tizas y pintura para marcar el pavimento.

Silbato y otro avisador acústico.

Aceite o material de similar inercia térmica y viscosidad. (Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

2.2. CÁLCULOS DE PARÁMETROS PROPORCIONADOS POR LA VIGA BENKELMAN

2.2.1. Cálculo de deflexiones

Para hacer los cálculos de las deflexiones máximas, se debe calcular la lectura inicial y la lectura final. Para la deflexión a 25 cm, se debe encontrar la diferencia entre la lectura final y la lectura a 25 cm.

Estas diferencias se multiplican por la relación de brazos de la viga Benkelman que usamos, en este caso la relación de 1:4; su factor es de 4 pero, en el caso que la viga utilizada tenga una relación diferente, se aplicara el factor que corresponda.

$$D_o = 4(L_m - L_o)$$

Donde:

L_m = Lectura final en 0,01 mm

L_o = Lectura inicial en 0,01 mm

L_{25} = Lectura a los 25 cm en 0,01 mm

2.2.2. Cálculo de Radio de Curvatura

El grado de curvatura de la línea elástica de deflexión en una característica de fundamental importancia, que determina la magnitud de la deformación lineal por

tracción que sufren las capas elásticas el flexionar bajo las cargas de tránsito. El radio de curvatura según la metodología francesa se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$RC = \frac{3125}{D_0 - D_{25}}$$

Donde:

RC = Radio de Curvatura

D_0 = Deflexión máxima

D_{25} = Deflexión a 25 cm

2.2.3. Cálculo de corrección de las deflexiones por temperatura

Para un pavimento, la magnitud de las deflexiones aumenta con un incremento de la temperatura de la carpeta asfáltica, atribuido a una menor rigidez de la mezcla. Para corregir la deflexión se corrigen respecto a una temperatura estándar de 20 °C.

$$D_{20^{\circ}C} = \frac{D_0}{0,001(T - 20^{\circ}C).h + 1}$$

Donde:

D_0 = Deflexión recuperable a la temperatura t.

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

h = Espesor de la carpeta asfáltica en cm, medido en el borde del pavimento.

T = Temperatura de la carpeta asfáltica al momento de ejecutarse en el ensayo.

(Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

2.2.4. Cálculo de la deflexión Característica

Es un parámetro estadístico, empleado para la caracterización representativa de los pavimentos. Para su determinación, es necesario contar con una base de datos de

deflexiones recuperables máximas (D_0), del tramo que se requiere evaluar, y establecer los parámetros estadísticos de dichos datos.

A continuación, se presenta la siguiente fórmula para poder hallar la deflexión característica.

$$D_C = D + t \cdot \sigma$$

Donde:

D_C = Deflexión característica.

t = Coeficiente que representa al porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la deflexión característica D_C .

σ = Desviación estándar.

Considerando que cada deflexión media representa una cierta extensión o área de pavimento, cada valor de “ t ” corresponderá a un porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la característica D_C correspondiente. (Encalada, Jorge y Galecio, Sindy. 2021)

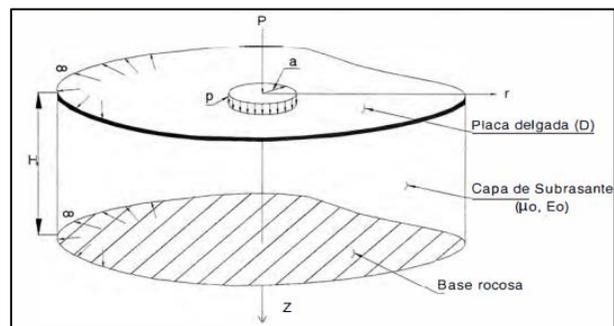
2.3. MODELO MATEMÁTICO DE HOGG

La compleja realidad del pavimento en cuanto a su funcionamiento y estructura real, es un problema que los investigadores intentan solucionar, proponiendo modelos teóricos y, su adecuada representación matemática, a fin de reproducir y solucionar, con la mejor aproximación, el comportamiento del pavimento. El método de evaluación propuesto está basado en la interpretación de curvas de deflexiones reemplazando la estructura real con un modelo teórico. Para tal fin se hace uso del Modelo de Hogg. Este método es usado para analizar deflexiones obtenidas con la Viga Benkelman simple de un solo brazo. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

El modelo de Hogg. - En los años 1938 y 1944, A.H.A. Hogg presentó solución matemática del modelo que se conoce con su nombre, dicho modelo cumple con los requisitos mencionados en el ítem anterior. Éste representa al pavimento como una

placa elástica de espesor delgado, horizontalmente infinita y, emplazada en una subrasante como una capa elástica homogénea, isotrópica y semi-infinita. Las cargas externas aplicadas al modelo pueden ser de distribución uniforme en un área circular de radio "a" o puntual, con respecto al espesor de la subrasante, Hogg, en el primer artículo lo representa como infinito más en el segundo como espesor finito, limitada por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa. La figura 5 describe la geometría y la tabla 1 describe los parámetros del modelo de Hogg. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

Figura 2.5. Esquema del modelo de Hogg



Fuente: Rivera Gómez, Flor (2010)

Tabla 2.1. Parámetros del modelo de Hogg

| | | | |
|--------------------------------------|--|-----------------------|--|
| PARÁMETROS BÁSICOS DEL MÓDULO | $D = \frac{E_1 t^3}{12(1-\mu_1^2)}$ | (t-m) | Rígidez a la flexión de la placa |
| | $l_0 = \frac{D(1+\mu_0)(3-4\mu_0)^{1/3}}{2(1-\mu_0)E_0}$ | (cm) | Longitud característica |
| | E_0 | (Kg/cm ²) | Módulo de elasticidad de la Subrasante |
| | μ_0 | (Adimensional) | Módulo de Poisson de la Subrasante |
| | H | (cm) | Profundidad del estrato rocoso |
| Parámetros de Evaluación | l_0, E_0, D | | Se obtienen conociendo dos valores de deflexiones medidas. |

Fuente: Rivera Gómez, Flor (2010)

2.3.1. Deflexiones en el Modelo de Hogg

La expresión matemática desarrollada para el cálculo de las deformaciones en la superficie del sistema viene dada por una integral infinita de funciones Bessel y funciones angulares hiperbólicas, la cual para el caso de una carga uniformemente distribuida circular de radio "a" tiene la siguiente forma:

$$\Delta_{(z=0;r)} = \frac{(1 + \mu_o)(3 - 4\mu_o)p \cdot a}{2(1 - \mu_o)E\phi} \int_0^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{mr}{l_o}\right)J_1\left(\frac{ma}{l_o}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{l_o}\right)} dm$$

Donde μ_o , $E\phi$, p , l_o , están definidos en la ecuación anterior, "r" es la distancia horizontal en la superficie de la placa desde el eje de carga, y " ϕ " viene dada por la siguiente expresión:

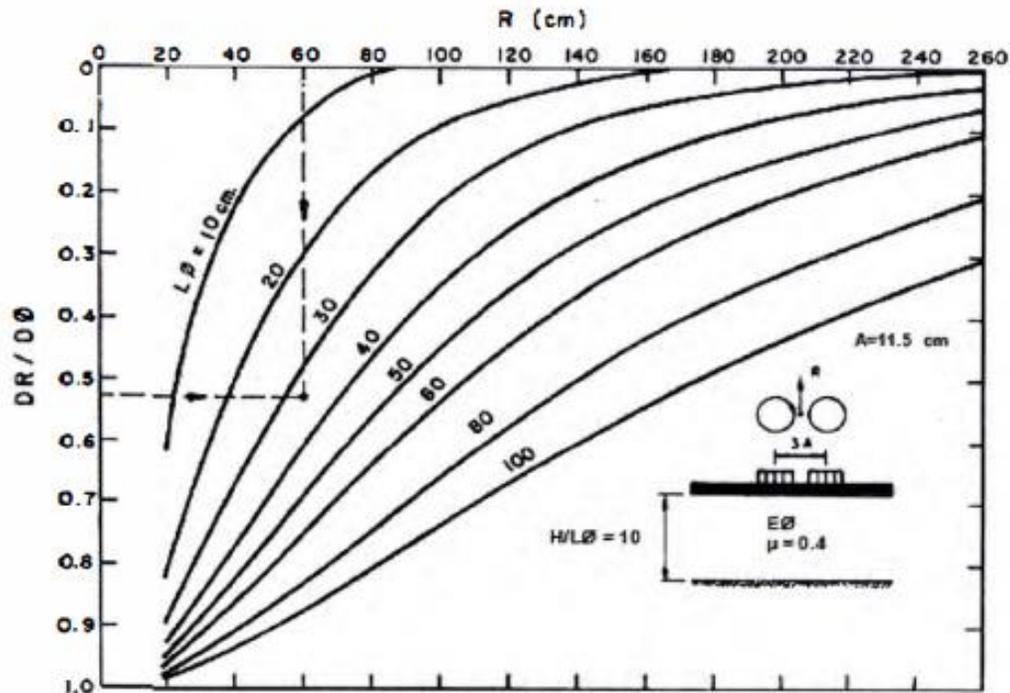
$$\phi = \frac{\text{Senh } m \text{ Cosh } m + \frac{m}{3 - 4\mu_o}}{\text{Senh}^2 m - \frac{m^2}{(3 - 4\mu_o)^2}}$$

Siendo "m" la variable de integración. Hoffman (1977) presentó la solución computarizada para la ecuación 1, la cual posibilitó la confección de nomogramas y tablas para el cálculo de deformaciones teóricas en cualquier punto de la superficie del sistema. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

2.3.2. Características y utilización del Modelo de Hogg

El modelo presentado y los conceptos desarrollados en torno a él, hacen posible caracterizar los materiales del sistema pavimento-subrasante en base al análisis e interpretación de las curvas de deflexiones. Para hacer uso del modelo de Hogg no se necesita conocer el espesor de las capas del pavimento, ya que las curvas de deflexiones de superficies teóricas, diseñadas mediante la ecuación 1, dependen solamente de la longitud elástica $L\phi$ (Ver figura 6), lo que constituye una ventaja toda vez que, la experiencia demuestra, en la gran mayoría de los pavimentos evaluados o se desconoce el espesor o es difícil controlar su variación. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

Figura 2.6. Curva de deflexiones en el modelo de Hogg para la configuración de carga para la Viga Benkelman

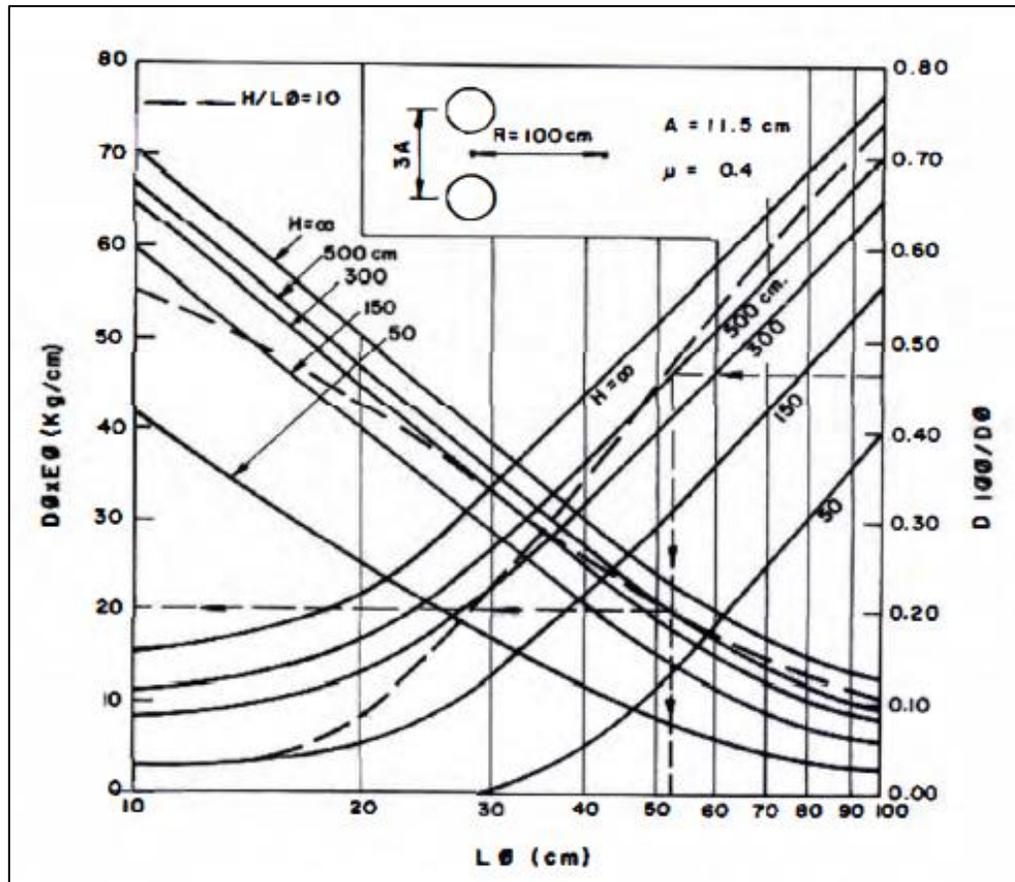


Fuente: Rivera Gómez, Flor (2010)

En el modelo se introduce, mediante la variable h , una capa rígida a una profundidad finita. En el procedimiento de evaluación ésta representa a una capa rocosa existente o funciona como un factor de ajuste que limita la extensión horizontal de las curvas de deflexiones teóricas, que de otra manera serían infinitas lo que se contradice con las curvas experimentales.

Por otro lado, la extensión finita de las curvas de deflexiones medidas pueden obedecer a una conducta no lineal de los materiales del pavimento y subrasante y no implica necesariamente que realmente existe una capa rígida. Para la utilización del modelo se sugiere la introducción de una capa rígida a una profundidad igual a 10 veces la longitud elástica del pavimento ($h=l_0$). (Rivera Gómez, Flor. 2010)

Figura 2.7. Nomograma para evaluación estructural basado en el Modelo de Hogg para la Viga Benkelman



Fuente: Rivera Gómez, Flor (2010)

Las curvas y nomogramas como los presentados en las figuras 6 y 7, constituyen la implementación práctica del modelo para la evaluación estructural de pavimentos. La figura 6 muestra las curvas de deflexiones adimensionales ($DR/D\phi$) obtenidas con el modelo de Hogg para una carga que simula la llanta doble utilizada con la Viga Benkelman. Así, por ejemplo, si se mide un $D\phi = 60 \times 10^{-2}$ mm y un $DR = 32 \times 10^{-2}$ mm a una distancia R de 60 cm., se obtiene un valor $DR/D\phi = 0.53$ que corresponde a un valor $L\phi = 34$ cm. La figura 3 muestra un nomograma preparado en base a las soluciones rigurosas del modelo de Hogg para determinar el módulo de elasticidad de la subrasante ($E\phi$). Este nomograma es para deflexiones medidas con la Viga Benkelman para una

carga de eje de 18 kilolibras, una huella circular de llanta de 11.5 cm., para $R=100$ cm, y para distintos espesores "h" de la capa rocosa. Así, por ejemplo, para $D\phi=50 \times 10^{-2}$ mm., $D100/D\phi=0.46$ y $h=500$ cm. se obtiene $L\phi=52$ cm, $D\phi E\phi=20$ kg/cm y $E\phi=20/D\phi=20/0.05=400$ kg/cm².

Para facilitar su uso en la interpretación de curvas de deflexiones se han desarrollado programas de computadoras de fácil acceso y que pueden utilizarse en microcomputadoras o computadoras personales que pueden ser usadas en el campo. Estos programas contemplan desarrollos basados en el análisis numérico de los conceptos vertidos en ésta y en secciones sucesivas de este informe.

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 métodos de medición de deflexiones. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

2.3.3. 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 las 18,000 libras y la presión de inflado es de 75 a 85 psi. En el modelo de carga (ver figura 6) 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

El análisis y el programa de computadora aceptan cualquier valor de carga y presión de inflado. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

2.3.4. Parámetros $H/L\phi$ y μ

La metodología de evaluación permite la selección de la profundidad de la "capa rocosa" y puede optarse por el valor $H/L\phi = 10$ ó $H/L\phi = 100$ que corresponde a una capa rocosa en el infinito. La adopción de uno u otro valor de $H/L\phi$ influye en todos los resultados de la evaluación: $L\phi$, $E\phi$ (CBR) y E^* .

Para estudios rutinarios se recomienda el uso del $H/L\phi = 10$ que implica que la capa rocosa se encuentra a una profundidad igual a 10 veces la longitud característica del pavimento. Así, para un $L\phi$ de 20 cm. se asume una capa rocosa de 2.0 m de profundidad, para $L\phi$ igual a 40 cm. la capa rocosa se encuentra a 4.0 m de profundidad, y así sucesivamente. Como se indicó previamente, el uso de un $H/L\phi$ finito (10 en este caso) produce resultados de evaluación más satisfactorios y representativos.

El valor $H/L\phi = 100$ (capa rocosa en el infinito) puede usarse para evaluar la sensibilidad de los resultados o para verificar el grado de concordancia entre curvas de deflexiones medidas y curvas teóricas cuando se cuenta con varios valores de deflexiones medidos a diferentes distancias de eje de la carga. Este chequeo es, a propósito, un método legítimo para verificar los resultados de evaluación según se ilustra más adelante. En cuanto al coeficiente de Poisson, μ , las soluciones aceptan los valores de 0.4 y 0.5, recomendándose el uso del valor 0.4 para trabajos rutinarios. De todas maneras, las diferencias en los resultados entre uno u otro valor no exceden típicamente del 10%.

Tabla 2.2. Coeficientes para el cálculo de R5 en el Modelo de Hogg

| H/L ϕ | μ | A | B | C |
|--------------------------|-----------------|--------|---|--------|
| ∞ | Cualquier Valor | 3.115 | 0 | 0.584 |
| 10 DR/D ϕ >0.7 | 0.5 | 2.460 | 0 | 0.592 |
| 10 DR/D ϕ <0.7 | 0.5 | 371.1 | 2 | 0.219 |
| 10 DR/D ϕ >0.426 | 0.4 | 2.629 | 0 | 0.548 |
| 10 DR/D ϕ <0.426 | 0.4 | 2283.4 | 3 | 0.2004 |

Fuente: Rivera Gómez, Flor. (2010)

Tabla 2.3. Coeficientes para el cálculo de L ϕ en el Modelo de Hogg

| H/L ϕ | μ | X | Y |
|------------|-----------------|-------|-------|
| 10 | 0.5 | 0.183 | 0.620 |
| 10 | 0.4 | 0.192 | 0.602 |
| ∞ | Cualquier Valor | 0.180 | 0.525 |

Fuente: Rivera Gómez, Flor. (2010)

2.3.5. Determinación de R5

R5 es la distancia "R" del centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal, en la cual se obtiene que la relación DR/D ϕ =0.5 en la curva de deflexiones. Para el modelo de Hogg se ha establecido que R5 puede determinarse usando la siguiente ecuación:

$$R5 = R \frac{A^C - B}{\left[A \left(\frac{D\phi}{DR} - 1 \right) \right]^C - B}$$

Donde:

R = Distancia a la que se mide la deflexión DR

D ϕ = Deflexión máxima

DR =Deflexión a la distancia R

A, B y C = Coeficientes cuyo valor se indica en la figura 2

El valor de RS sirve de insumo para determinar la longitud elástica (L ϕ) del pavimento según se explica a continuación. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

2.3.6. Determinación de la longitud elástica (L ϕ)

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

$$L\phi = \frac{Y \cdot R5 + \sqrt{(Y \cdot R5)^2 - 4 \cdot A \cdot X \cdot R5}}{2}$$

Donde:

R5 = Calculado en la anterior ecuación

A = Radio de la huella circular de carga

X, Y = Coeficiente de correlación cuyo valor se indica en la figura 6

El valor de L ϕ sirve de insumo para determinar el módulo de elasticidad de la subrasante (E ϕ) según se explica a continuación. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

2.3.7. Determinación del Módulo de Elasticidad de la Subrasante (E_{ϕ})

La determinación del módulo de elasticidad de la subrasante constituye un punto central de la metodología de evaluación. Para desarrollar soluciones numéricas programables en computadora, esta determinación se efectúa en 2 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_{ϕ} . La rigidez se define como el cociente entre la carga y la deflexión ($S=P/D_{\phi}$). La relación teórica se calcula por medio de la ecuación:

$$\frac{S_o}{S} = 1 - M \left(\frac{A}{L_{\phi}} - 0,10 \right)$$

Donde:

S_o = Rigidez para carga puntual

S = Rigidez para carga de área

M = Coeficiente numérico que adopta los siguientes valores:

Para $H/L_{\phi}=10$; $\mu=0,5$; $M=0,52$

Para $H/L_{\phi}=10$; $\mu=0,4$; $M=0,48$

Para $H/L_{\phi}=\infty$; μ =cualquier valor; $M=0,44$

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

$$E_{\phi} = \frac{K \cdot I \cdot P \cdot S_o}{L_{\phi} \cdot D_{\phi} \cdot S}$$

Donde:

K = Coeficiente numérico que depende del coeficiente de Poisson de la subrasante y que adopta los siguientes valores:

Para $\mu=0,5$; $K=1,5$

Para $\mu=0,4$; $K=1,633$

I = Coeficiente numérico que adopta los siguientes valores:

Para $H/L\phi=10$; $\mu=0,5$; $I=0,1614$

Para $H/L\phi=10$; $\mu=0,4$; $I=0,1689$

Para $H/L\phi=\infty$; μ =cualquier valor; $I=0,1925$

P = Carga total en la llanta doble

$L\phi$ = Longitud elástica

$D\phi$ = Deflexión medida máxima

2.3.8. Cálculo del módulo de elasticidad equivalente del pavimento (E^*)

El módulo de elasticidad equivalente del pavimento (E^*) representa a todas las capas del pavimento por encima de la subrasante. Para un pavimento flexible típico, compuesto de carpeta asfáltica y base granular, el módulo E^* representa a la carpeta y la base combinadas con un espesor total igual a la suma de los espesores de cada capa. Una solución programable aproximada ha sido propuesta por Ullidtz (1977, 1980) y se basa en los siguientes conceptos. El módulo combinado (E^*) de la carpeta asfáltica y la base, con un espesor $HC=H1+H2$ se determina usando el concepto del espesor equivalente. Este espesor equivalente se determina de la siguiente ecuación:

$$HE = 0,9 \cdot HC \left(\frac{E^*}{E_0} \right)^{1/3}$$

La relación entre la deflexión máxima ($D\phi$), el módulo de elasticidad de la subrasante ($E\phi$) y el módulo de elasticidad del pavimento (E^*) está expresada por la siguiente ecuación:

$$D_{\phi} = \frac{(1 + \mu)P}{2\pi} \left\{ \frac{1}{E^*} \left[\frac{2(1 - \mu)}{r} - \frac{1}{R1} \left(2(1 - \mu) + \left(\frac{Z1}{R1} \right)^2 \right) \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{E_{\phi}} \left[\frac{1}{R2} \left(2(1 - \mu) + \left(\frac{Z2}{R2} \right)^2 \right) \right] - \frac{1}{R3} \left(2(1 - \mu) + \left(\frac{Z3}{R3} \right)^2 \right) \right\}$$

Donde:

$$r = 1,5 \cdot A$$

$$R1 = \sqrt{(Z1)^2 + (1,5 \cdot A)^2}$$

$$Z1 = HC + 0,6 \frac{A^2}{HC}$$

$$R2 = \sqrt{(Z2)^2 + (1,5 \cdot A)^2}$$

$$Z2 = HE + 0,6 \frac{A^2}{HE}$$

$$R3 = \sqrt{(Z3)^2 + (1,5 \cdot A)^2}$$

$$Z3 = (HE + NL_{\phi}) + 0,6 \frac{A^2}{(HE + NL_{\phi})}$$

N = 10 para base rocosa a espesor finito (H/L ϕ =10)

N = 100 para base rocosa a espesor infinito (H/L ϕ = ∞)

P = Carga de ensayo = $\pi A^2 p$ (p = presión de inflado)

Esta ecuación se resuelve iterativamente en la computadora para determinar el valor de E*, para cualquier combinación de valores de E ϕ , HC, P, p, D ϕ , R, DR, H/L ϕ y μ . (Rivera Gómez, Flor. 2010)

2.3.9. Parámetro de evaluación

Según se ha expuesto, la metodología de evaluación estructural de pavimentos basada en la interpretación de deflexiones de superficie se sustenta matemáticamente en el

Modelo de Hogg y en conceptos de la teoría de la elasticidad y resistencia de materiales. Los insumos para el procesamiento de los datos se dividen en cuatro (4) categorías:

- ❖ Datos de carga (P y p)
- ❖ Deflexiones medidas ($D\phi$, DR y R)
- ❖ Datos de pavimento (Espesores y características de las capas)
- ❖ Parámetros del modelo ($H/L\phi$ y μ)

La metodología, por su parte, produce los siguientes datos de salida: $L\phi$, $E\phi$ y E^* . Obviamente, los datos de salida dependen de los datos de entrada. La carga de ensayo es generalmente un dato fijo para cada proyecto y salvo circunstancias especiales debe estar en el rango recomendado de $P=18$ kilolibras y $p=75-85$ psi. Las deflexiones medidas son el resultado de los ensayos y varían seguramente de proyecto a proyecto y entre diferentes puntos de un mismo proyecto debido a la heterogeneidad del pavimento y su subrasante y a errores inevitables de medición. La selección de una o más distancias "R" depende del proyecto y del criterio del Ingeniero, aunque es común y práctico medir, como mínimo, $D\phi$, D50 y D100 a distancias de 0, 50 y 100 cm. del eje de la carga. Los espesores y características de las capas del pavimento no siempre se conocen, a menos que existan datos históricos de construcción y/o diseño o se perforen calicatas. Esta información es necesaria para determinar "HC", cuyo valor influye en " E^* " pero no influye en los valores de $L\phi$ y $E\phi$ siendo esta una característica importante del modelo de Hogg. El significado de los parámetros del modelo se discute a continuación. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

Significado de $L\phi$.- La longitud característica ($L\phi$) del pavimento es, por definición, un parámetro que refleja la rigidez relativa entre un pavimento y su subrasante. Por tratarse de una relación de rigideces, el valor de $L\phi$ permite una rápida evaluación cualitativa del sistema pavimento-subrasante.

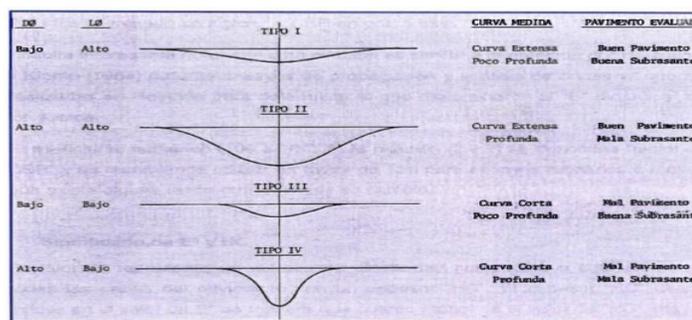
En un extremo de la escala puede pensarse en un pavimento rígido (losa de concreto) sobre una subrasante débil con un $L\phi$ del orden de los 80 cm. En el otro extremo se

encuentra un pavimento compuesto de una capa granular sin revestimiento sobre una subrasante fuerte y un $L\phi$ del orden de los 15 cm. No hay que olvidar que se trata de una relación de rigideces de manera que un valor bajo de $L\phi$ puede corresponder tanto al caso de un buen pavimento sobre una buena subrasante como el caso de un mal pavimento sobre una débil subrasante. La determinación de $L\phi$ en el proceso de evaluación depende solamente del cociente $DR/D\phi$ y del valor R . Es decir que 2 pavimentos cualesquiera con igual cociente $DR/D\phi$ a una misma distancia R dada, tiene el mismo $L\phi$ aunque DR y $D\phi$ sean diferentes. Los valores específicos de $D\phi$ y DR influyen en los módulos E_0 y E^* según se explica más adelante. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

Significado de $E\phi$ y su relación con el CBR. - El parámetro $E\phi$ representa el módulo de elasticidad de la masa de subsuelo que participa en la deformación del sistema pavimento-subrasante. En la ecuación para determinar HE puede verse que $E\phi$ es inversamente proporcional a $D\phi$ y a $L\phi$, es decir que $E\phi$ es menor cuanto mayor es la deflexión y la longitud característica del pavimento para una relación de rigideces S_0/S dada, y viceversa.

El primer caso corresponde a un pavimento que tiene una curva de deflexiones profunda y extensa y, en general pueden establecerse las relaciones cualitativas entre las características de la curva de deflexiones y el sistema que se ilustra en la figura 5. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

Figura 2.8. Significado cualitativo de los diferentes tipos de curvas de deflexiones



Fuente: Rivera Gómez, Flor. (2010)

Cabe insistir que las de la figura 4, son relaciones comparativas generales que pretenden ayudar en la visualización del significado de E_{ϕ} y el pavimento en relación con las características de la curva de deflexiones medida.

A pesar que el módulo E_{ϕ} es un parámetro mecánico fundamental del subsuelo, se ha establecido, además, una relación entre este valor y el valor de CBR de la subrasante, para facilitar el diseño del refuerzo requerido o para verificar diseños usando métodos tradicionales. Esta relación ha sido establecida experimentalmente, comparando los valores de E_{ϕ} obtenidos de la metodología de evaluación estructural, usando deflexiones medidas con la viga Benkelman y valores de CBR obtenidos en sitio.

De numerosas comparaciones de este tipo se ha podido establecer la siguiente relación:

$$E_{\phi} = f * CBR$$

Donde:

E_{ϕ} = Expresado en Kg/cm^2

CBR = Expresado en porcentaje

f = Factor de CBR que varía de 100 a 160, se recomienda utilizar un factor de 110 para ensayos rutinarios a menos que exista alguna razón que justifique su cambio.

Resulta interesante notar que esta relación es similar a la obtenida por Heukelom y Klomp (1964) durante ensayos de propagación y análisis de ondas vibratorias realizadas en Holanda para determinar lo que denominaron el "E* dinámico" de los suelos. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

Significado de (E* y HC). - El valor E* representa un módulo de elasticidad compuesto o equivalente de todas las capas del pavimento con un espesor "HC". El espesor "HC" usado influye en el valor de E* de manera que cuanto menor es el valor de "HC", mayor es el valor de E* obtenido.

Los valores HC y E^* están interconectados y son, en cierta medida, intercambiables. Para ilustrar este concepto es conveniente pensar en términos de diseño: para una subrasante y tráfico dados el ingeniero de diseño puede optar por un espesor pequeño de excelentes materiales (bajo HC y alto E^*) o un espesor grande de materiales mediocres (alto HC y bajo E^*). En ambos casos el ingeniero trata de proteger a la subrasante contra esfuerzos excesivos y cuenta para esto con varias combinaciones de HC y E^* (los extremos serían un pavimento rígido vs. un pavimento flexible).

En base a consideraciones de diseño y a la teoría de capas elásticas, Hoffman (1977) ha establecido que un pavimento flexible, adecuadamente diseñado, debe guardar una relación modular $EP/E\phi$ entre 2 y 4, pudiéndose usar, para fines prácticos, la relación.

$$EP = 3 \cdot E\phi$$

En base al concepto de rigidez flexionante, se plantea que, si el pavimento evaluado con módulo de elasticidad E^* y espesor HC es equivalente a un pavimento nuevo con módulo EP y espesor HEQ, se debe guardar la siguiente relación entre la rigidez flexionante del pavimento evaluado y la del pavimento nuevo:

$$E^*(HC)^3 = EP (HEQ)^3$$

Introduciendo la relación anterior a esta ecuación, se obtiene que:

$$E^*(HC)^3 = 3 \cdot E\phi (HEQ)^3$$

$$\frac{HEQ}{HC} = \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{E^*}{E\phi} \right)^{1/3}$$

Esta última ecuación constituye la base para asignar un crédito estructural al pavimento existente con módulo E^* y espesor HC desde el punto de vista del diseño. Por ejemplo, si un pavimento evaluado tiene una relación modular $E^*/E\phi$ de 3, su HC es totalmente utilizable desde el punto de vista estructural ($HEQ/HC = 1$). En cambio, si la relación modular evaluada es 2, sólo un 87% del HC cuenta como espesor estructural utilizable. Por el contrario, si la relación modular evaluada es 5, el espesor estructuralmente utilizable es igual al 118% de HC dando así crédito al buen módulo E^* evaluado en el

pavimento existente. El espesor H_{EQ} puede considerarse entonces como el espesor efectivo en términos de "base granular" del pavimento existente de acuerdo a los valores de H_C , E^* y $E\phi$ evaluados.

El siguiente paso consiste en la comparación entre este espesor efectivo y el espesor requerido para una demanda anticipada de tráfico, para establecer las necesidades de refuerzo estructural. (Rivera Gómez, Flor. 2010)

$$DH = HD - HEQ$$

Donde:

DH = Espesor del refuerzo de material granular

HD = Espesor requerido de diseño

HEQ = Espesor efectivo del pavimento existente

2.3.10. Diseño de Refuerzo Estructural

Para ilustrar el concepto del diseño del refuerzo considérese el método de diseño para pavimentos de mediano volumen de tráfico propuesto por el Laboratorio de Investigación del Transporte Vial Británico (TRRL, 1982). Las curvas de diseño originales, basadas en el concepto de CBR, pueden aproximarse analíticamente por medio de la siguiente expresión:

$$HD = (CBR)^{-0,59}(4,63 + 6,09 \cdot \log N_{18})$$

Donde:

HD = Espesor requerido de diseño en pulgadas de material de base (CBR=80%)

CBR = CBR de diseño de la subrasante.

N_{18} = Número de aplicaciones de diseño del eje de carga equivalente de 18 kilolibras.

Después reemplazando valores se determina DH. Este DH obtenido representa un espesor requerido de base granular, el cual puede ser convertido en espesor requerido de carpeta asfáltica usando factores de equivalencia, que en la literatura fluctúan entre 1.5 y 4.0 cm. de base por cm de carpeta asfáltica (1.5 para la FAA y 3.2 a 4.0 para la AASHTO). Adoptando un factor de equivalencia de 3.0 (a tono ilustrativo). En forma similar se pueden determinar las necesidades de refuerzo de cualquier pavimento.

Una de las ventajas destacables de la metodología propuesta radica en el cálculo del espesor efectivo del pavimento evaluado (HEQ) dando crédito estructural al espesor existente (HC) de acuerdo a su condición (E^*). (Rivera Gómez, Flor. 2010).

2.4. Rangos admisibles de las variables de Hogg

Los rangos admisibles de las variables de cálculo que estable el modelo matemático de Hogg aplicando la viga Benkelman, son las siguientes:

Tabla 2.4. Rangos admisibles de variables de Hogg.

| Método aplicado | Variable | Rango admisible |
|---------------------------|--|--|
| Ensayo viga Benkelman | Deflexión Radio de curvatura | 0 a 5 mm Mín. 80 m |
| Modelo matemático de Hogg | Módulo de Elasticidad CBR Refuerzo estructural | 850 a 1000 Kg/cm ² 5 a 35 % 3 a 10 cm |

Fuente: Reyes Lizcano. (2003)

CAPÍTULO III

DETERMINACIÓN DEL REFUERZO ESTRUCTURAL CON EL MODELO DE HOGG

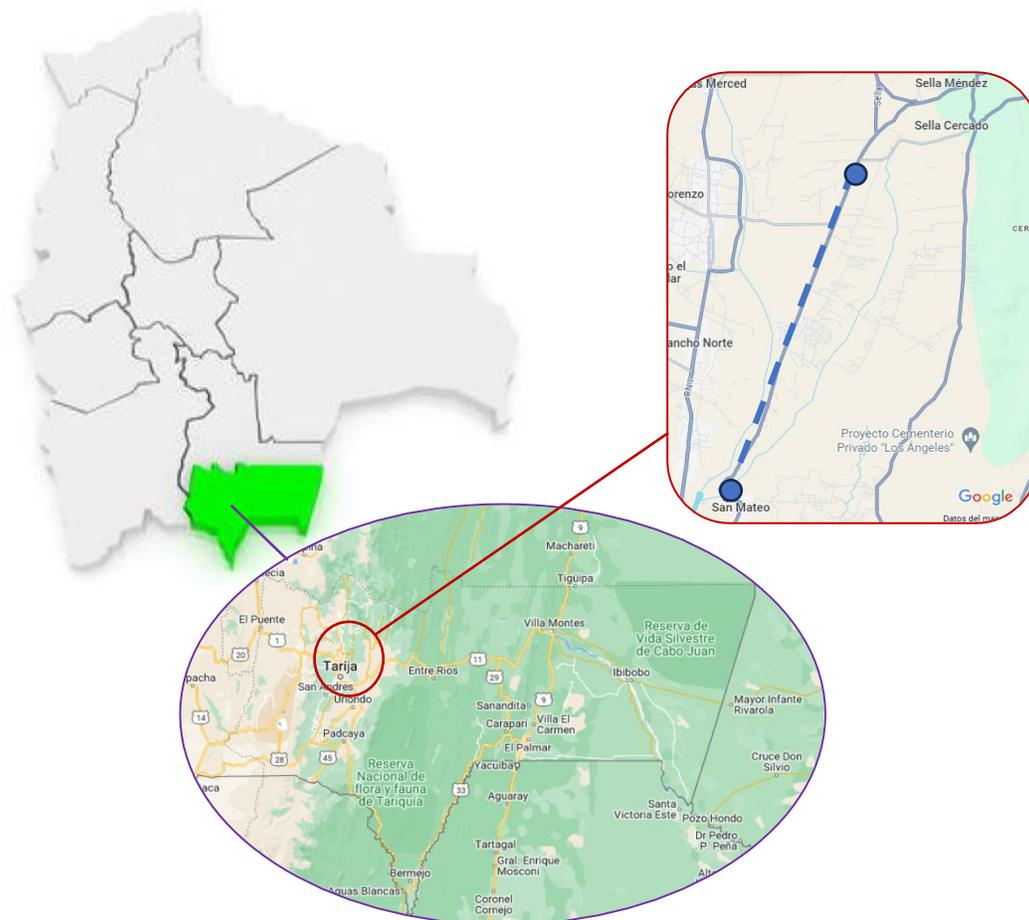
CAPÍTULO III

DETERMINACIÓN DEL REFUERZO ESTRUCTURAL CON EL MODELO DE HOGG

3.1. UBICACIÓN DEL TRAMO PARA LA APLICACIÓN PRÁCTICA

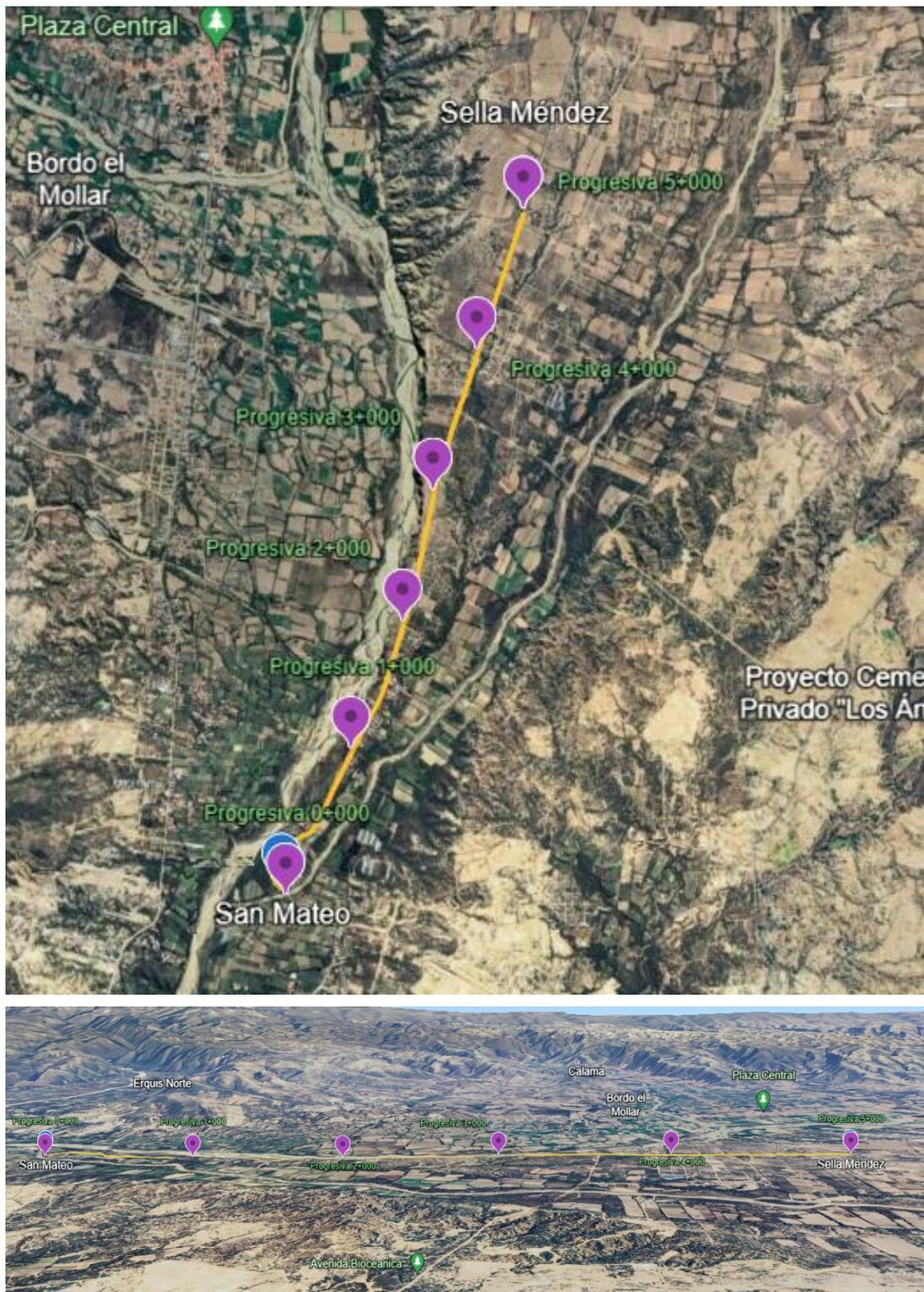
El tramo en estudio se encuentra ubicado en Bolivia, en el departamento de Tarija, provincia Méndez, primera sección San Lorenzo, el tramo une las comunidades de San Mateo y Sella Méndez.

Figura. 3.1. Ubicación del lugar.



Fuente: Fuente: <https://es.123rf.com/>

Figura. 3.2. Progresivas del tramo.



Fuente: Google Earth

Las coordenadas geodésicas son:

Inicio del tramo (San Mateo):

Latitud 21°28'8" S

Longitud 64°44'50" O

Fin del tramo (Sella Méndez):

Latitud 21°25'41" S

Longitud 64°43'45" O

3.2. DATOS Y ESPECIFICACIONES DEL TRAMO

| | | |
|---------------------------|---|----------------------|
| Tipo de pavimento | = | Pavimento flexible |
| Capa asfáltica (e) | = | 6 cm |
| Capa base | = | 15 cm |
| Capa sub base | = | 20 cm |
| Calzada | = | 7 m |
| Carril | = | 2 carriles de 3.50 m |
| Pendiente longitud máxima | = | 7% |
| Longitud | = | 5,00 km |

3.3. OBTENCIÓN DE DATOS CON LA VIGA BENKELMAN

3.3.1. Procedimiento de la práctica

Este ensayo comenzamos con el pesaje de la volqueta a ser utilizada de 8,2 ton, una vez el en lugar (San Mateo) se inició en la progresiva 0+000, luego se realizó el ensayo cada 200 metros primero por el carril de ida (5km) y posteriormente por el carril de vuelta (5km), haciendo un total de 10 km de estudio.

El procedimiento fue el siguiente:

Una vez armada la viga comenzamos con el ensayo, se realizó en la huella interna. Escogido el lugar se procedió a colocar el brazo móvil de la viga Benkelman entre las dos ruedas de la volqueta, cuando se encuentra seguro se indica que la volqueta

comience su marcha lentamente. Las lecturas que se tomaron del extensómetro de la viga Benkelman fueron al inicio, a 50 cm, 100 cm, 150 cm, a 200 cm y a 500 cm.

Figura 3.3. Medición de las distancias cada 50 cm.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4. Posicionamiento de la viga Benkelman.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5. Toma de temperatura superficial del pavimento.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6. Manipulación del extensómetro digital.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.7. Calibración del extensómetro antes del ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.8. Momento del ensayo en los primeros 50 cm de avance de la volqueta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.9. Lectura del extensómetro después de la recuperación del pavimento.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Datos de la práctica

Se tomará como ejemplo el primer kilómetro del carril de ida, de la progresiva 1+000.

Tabla 3.1. Datos de viga Benkelman progresiva 1+000.

| N° | Progresiva | Lecturas del dial | | | | | |
|----|------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | L-0cm 0.01 mm | L-50cm 0.01 mm | L-100cm 0.01 mm | L-150cm 0.01 mm | L-200cm 0.01 mm | L-500cm 0.01 mm |
| 6 | 01+000 | 0 | 6 | 6 | 6 | 8 | 12 |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Procedimiento de cálculo

Corrección por temperatura. Se realiza esta corrección ya que las lecturas deben llevarse a una temperatura estándar de 20°C.

$$L_0^l = \frac{L_0}{k * (t - 20) * e + 1} * Fce$$

$$L_0^l = \frac{12}{0.001 * (38 - 20) * 6 + 1} * 1,1$$

$$L_0^l = 11,91$$

Deflexión máxima:

$$D_0 = K * (L_0^l - L_f^l)$$

$$D_0 = 1 * (11,91 - 0)$$

$$D_0 = 11,91$$

$$D_0 = 11,91 * 0.01$$

$$D_0 = 0.1191 \text{ mm}$$

Deflexión a 50 cm:

$$L_{50}^l = \frac{L_0 - L_{50}}{k * (t - 20) * e + 1} * Fce$$

$$L_{50}^l = \frac{12 - 6}{0.001 * (38 - 20) * 6 + 1} * 1,1$$

$$L_{50}^l = 5,96$$

$$D_{50} = K * (L_{50}^1 - L_f^1)$$

$$D_{50} = 1 * (5,96 - 0)$$

$$D_{50} = 5,96$$

$$D_{50} = 5,96 * 0.01$$

$$D_{50} = 0.0596 \text{ mm}$$

Radio de curvatura:

$$Rc = \frac{6250}{k * (D_0 - D_{50})}$$

$$Rc = \frac{6250}{2 * (11,91 - 5,96)}$$

$$Rc = 524,62 \text{ m}$$

3.3.4. Resultados obtenidos con la viga Benkelman de todo el tramo

A continuación, se detalla un resumen de los resultados de las planillas detalladas en anexos.

Tabla 3.2. Resultados obtenidos con la viga Benkelman.

| Punto | Progresiva | Carril | D ₀ = D ₀ | D ₅₀ = DR | Dc | Dadm | RC | RCmín | RCc |
|-------|------------|--------|---------------------------------|----------------------|----------|----------|--------|-------|--------|
| N° | (Km) | | (0,01mm) | (0,01mm) | (0,01mm) | (0,01mm) | (m) | (m) | (m) |
| 1 | 00+000 | Ida | 13,97 | 7,99 | 18,54 | 77,99 | 521,78 | 80 | 919,48 |
| 2 | 00+200 | Ida | 15,97 | 7,99 | 18,54 | 77,99 | 391,34 | 80 | 919,48 |
| 3 | 00+400 | Ida | 11,98 | 7,99 | 18,54 | 77,99 | 782,67 | 80 | 919,48 |
| 4 | 00+600 | Ida | 15,88 | 11,91 | 18,54 | 77,99 | 786,93 | 80 | 919,48 |
| 5 | 00+800 | Ida | 17,87 | 13,90 | 18,54 | 77,99 | 786,93 | 80 | 919,48 |
| 6 | 01+000 | Ida | 11,91 | 5,96 | 18,54 | 77,99 | 524,62 | 80 | 919,48 |
| 7 | 01+200 | Ida | 13,90 | 7,94 | 24,30 | 77,99 | 524,62 | 80 | 868,67 |
| 8 | 01+400 | Ida | 15,88 | 9,93 | 24,30 | 77,99 | 524,62 | 80 | 868,67 |
| 9 | 01+600 | Ida | 19,86 | 15,88 | 24,30 | 77,99 | 786,93 | 80 | 868,67 |
| 10 | 01+800 | Ida | 15,88 | 9,93 | 24,30 | 77,99 | 524,62 | 80 | 868,67 |
| 11 | 02+000 | Ida | 23,70 | 19,75 | 24,30 | 77,99 | 791,19 | 80 | 868,67 |
| 12 | 02+200 | Ida | 17,77 | 13,82 | 22,27 | 77,99 | 791,19 | 80 | 966,10 |
| 13 | 02+400 | Ida | 21,72 | 17,77 | 22,27 | 77,99 | 791,19 | 80 | 966,10 |
| 14 | 02+600 | Ida | 17,77 | 11,85 | 22,27 | 77,99 | 527,46 | 80 | 966,10 |
| 15 | 02+800 | Ida | 19,75 | 15,80 | 22,27 | 77,99 | 791,19 | 80 | 966,10 |
| 16 | 03+000 | Ida | 15,80 | 7,90 | 22,27 | 77,99 | 395,60 | 80 | 966,10 |

| Punto | Progresiva | Carril | D ₀ = D _Ø | D ₅₀ = DR | D _c | D _{adm} | RC | RC _{mín} | RC _c |
|-------|------------|--------|---------------------------------|----------------------|----------------|------------------|--------|-------------------|-----------------|
| N° | (Km) | | (0,01mm) | (0,01mm) | (0,01mm) | (0,01mm) | (m) | (m) | (m) |
| 17 | 03+200 | Ida | 35,55 | 21,72 | 40,04 | 77,99 | 226,06 | 80 | 319,77 |
| 18 | 03+400 | Ida | 33,57 | 23,70 | 40,04 | 77,99 | 316,48 | 80 | 319,77 |
| 19 | 03+600 | Ida | 39,50 | 27,65 | 40,04 | 77,99 | 263,73 | 80 | 319,77 |
| 20 | 03+800 | Ida | 35,55 | 23,70 | 40,04 | 77,99 | 263,73 | 80 | 319,77 |
| 21 | 04+000 | Ida | 37,52 | 25,67 | 40,04 | 77,99 | 263,73 | 80 | 319,77 |
| 22 | 04+200 | Ida | 39,50 | 23,70 | 42,19 | 77,99 | 197,80 | 80 | 337,33 |
| 23 | 04+400 | Ida | 35,55 | 25,67 | 42,19 | 77,99 | 316,48 | 80 | 337,33 |
| 24 | 04+600 | Ida | 41,25 | 23,57 | 42,19 | 77,99 | 176,77 | 80 | 337,33 |
| 25 | 04+800 | Ida | 37,32 | 25,54 | 42,19 | 77,99 | 265,15 | 80 | 337,33 |
| 26 | 05+000 | Ida | 39,29 | 27,50 | 42,19 | 77,99 | 265,15 | 80 | 337,33 |
| 27 | 05+000 | Vuelta | 37,12 | 27,35 | 40,25 | 77,99 | 319,89 | 80 | 522,84 |
| 28 | 04+800 | Vuelta | 35,17 | 25,40 | 40,25 | 77,99 | 319,89 | 80 | 522,84 |
| 29 | 04+600 | Vuelta | 39,08 | 27,35 | 40,25 | 77,99 | 266,57 | 80 | 522,84 |
| 30 | 04+400 | Vuelta | 31,26 | 25,40 | 40,25 | 77,99 | 533,14 | 80 | 522,84 |
| 31 | 04+200 | Vuelta | 33,21 | 23,45 | 40,25 | 77,99 | 319,89 | 80 | 522,84 |
| 32 | 04+000 | Vuelta | 37,12 | 29,31 | 42,16 | 77,99 | 399,86 | 80 | 413,73 |
| 33 | 03+800 | Vuelta | 41,03 | 29,31 | 42,16 | 77,99 | 266,57 | 80 | 413,73 |
| 34 | 03+600 | Vuelta | 38,87 | 29,15 | 42,16 | 77,99 | 321,59 | 80 | 413,73 |
| 35 | 03+400 | Vuelta | 40,81 | 25,27 | 42,16 | 77,99 | 200,99 | 80 | 413,73 |
| 36 | 03+200 | Vuelta | 36,93 | 23,32 | 42,16 | 77,99 | 229,71 | 80 | 413,73 |
| 37 | 03+000 | Vuelta | 31,10 | 23,32 | 32,90 | 77,99 | 401,99 | 80 | 439,15 |
| 38 | 02+800 | Vuelta | 27,07 | 17,40 | 32,90 | 77,99 | 323,30 | 80 | 439,15 |
| 39 | 02+600 | Vuelta | 29,00 | 19,33 | 32,90 | 77,99 | 323,30 | 80 | 439,15 |
| 40 | 02+400 | Vuelta | 30,93 | 23,20 | 32,90 | 77,99 | 404,12 | 80 | 439,15 |
| 41 | 02+200 | Vuelta | 25,00 | 13,46 | 32,90 | 77,99 | 270,83 | 80 | 439,15 |
| 42 | 02+000 | Vuelta | 23,08 | 15,38 | 33,26 | 77,99 | 406,25 | 80 | 447,89 |
| 43 | 01+800 | Vuelta | 26,92 | 19,23 | 33,26 | 77,99 | 406,25 | 80 | 447,89 |
| 44 | 01+600 | Vuelta | 28,85 | 17,31 | 33,26 | 77,99 | 270,83 | 80 | 447,89 |
| 45 | 01+400 | Vuelta | 25,00 | 13,46 | 33,26 | 77,99 | 270,83 | 80 | 447,89 |
| 46 | 01+200 | Vuelta | 32,52 | 22,96 | 33,26 | 77,99 | 326,70 | 80 | 447,89 |
| 47 | 01+000 | Vuelta | 22,96 | 15,30 | 27,62 | 77,99 | 408,38 | 80 | 580,40 |
| 48 | 00+800 | Vuelta | 24,87 | 15,30 | 27,62 | 77,99 | 326,70 | 80 | 580,40 |
| 49 | 00+600 | Vuelta | 21,27 | 15,47 | 27,62 | 77,99 | 538,83 | 80 | 580,40 |
| 50 | 00+400 | Vuelta | 27,07 | 17,40 | 27,62 | 77,99 | 323,30 | 80 | 580,40 |
| 51 | 00+200 | Vuelta | 21,38 | 13,60 | 27,62 | 77,99 | 401,99 | 80 | 580,40 |
| 52 | 00+000 | Vuelta | 25,27 | 19,43 | 27,62 | 77,99 | 535,98 | 80 | 580,40 |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5. Análisis de la evaluación estructural realizada con la viga Benkelman

Tabla 3.3. Análisis de deflexiones máximas del tramo

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | $D_0 = D_0$ | D_c | D_{adm} | Valoración | Conclusión |
|-------------|--------------------|--------|-------------|----------|-----------|-------------------|-------------------|
| | | | (0,01mm) | (0,01mm) | (0,01mm) | | |
| 1 | 00+000 | Ida | 13,97 | 18,54 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 2 | 00+200 | Ida | 15,97 | 18,54 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 3 | 00+400 | Ida | 11,98 | 18,54 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 4 | 00+600 | Ida | 15,88 | 18,54 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 5 | 00+800 | Ida | 17,87 | 18,54 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 6 | 01+000 | Ida | 11,91 | 18,54 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 7 | 01+200 | Ida | 13,90 | 24,30 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 8 | 01+400 | Ida | 15,88 | 24,30 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 9 | 01+600 | Ida | 19,86 | 24,30 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 10 | 01+800 | Ida | 15,88 | 24,30 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 11 | 02+000 | Ida | 23,70 | 24,30 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 12 | 02+200 | Ida | 17,77 | 22,27 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 13 | 02+400 | Ida | 21,72 | 22,27 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 14 | 02+600 | Ida | 17,77 | 22,27 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 15 | 02+800 | Ida | 19,75 | 22,27 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 16 | 03+000 | Ida | 15,80 | 22,27 | 77,99 | $D_0 < 25 =$ Baja | Subrasante fuerte |
| 17 | 03+200 | Ida | 35,55 | 40,04 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 18 | 03+400 | Ida | 33,57 | 40,04 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 19 | 03+600 | Ida | 39,50 | 40,04 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 20 | 03+800 | Ida | 35,55 | 40,04 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 21 | 04+000 | Ida | 37,52 | 40,04 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 22 | 04+200 | Ida | 39,50 | 42,19 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 23 | 04+400 | Ida | 35,55 | 42,19 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 24 | 04+600 | Ida | 41,25 | 42,19 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 25 | 04+800 | Ida | 37,32 | 42,19 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 26 | 05+000 | Ida | 39,29 | 42,19 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 27 | 05+000 | Vuelta | 37,12 | 40,25 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 28 | 04+800 | Vuelta | 35,17 | 40,25 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 29 | 04+600 | Vuelta | 39,08 | 40,25 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 30 | 04+400 | Vuelta | 31,26 | 40,25 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 31 | 04+200 | Vuelta | 33,21 | 40,25 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 32 | 04+000 | Vuelta | 37,12 | 42,16 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 33 | 03+800 | Vuelta | 41,03 | 42,16 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 34 | 03+600 | Vuelta | 38,87 | 42,16 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |
| 35 | 03+400 | Vuelta | 40,81 | 42,16 | 77,99 | $D_0 > 25 =$ Alta | Subrasante débil |

| Punto | Progresiva | Carril | $D_0 = D_0$ | Dc | Dadm | Valoración | Conclusión |
|-------|------------|--------|-------------|----------|----------|--------------------------|-------------------|
| N° | (Km) | | (0,01mm) | (0,01mm) | (0,01mm) | | |
| 36 | 03+200 | Vuelta | 36,93 | 42,16 | 77,99 | $D_0 > 25 = \text{Alta}$ | Subrasante débil |
| 37 | 03+000 | Vuelta | 31,10 | 32,90 | 77,99 | $D_0 > 25 = \text{Alta}$ | Subrasante débil |
| 38 | 02+800 | Vuelta | 27,07 | 32,90 | 77,99 | $D_0 > 25 = \text{Alta}$ | Subrasante débil |
| 39 | 02+600 | Vuelta | 29,00 | 32,90 | 77,99 | $D_0 > 25 = \text{Alta}$ | Subrasante débil |
| 40 | 02+400 | Vuelta | 30,93 | 32,90 | 77,99 | $D_0 > 25 = \text{Alta}$ | Subrasante débil |
| 41 | 02+200 | Vuelta | 25,00 | 32,90 | 77,99 | $D_0 < 25 = \text{Baja}$ | Subrasante fuerte |
| 42 | 02+000 | Vuelta | 23,08 | 33,26 | 77,99 | $D_0 < 25 = \text{Baja}$ | Subrasante fuerte |
| 43 | 01+800 | Vuelta | 26,92 | 33,26 | 77,99 | $D_0 > 25 = \text{Alta}$ | Subrasante débil |
| 44 | 01+600 | Vuelta | 28,85 | 33,26 | 77,99 | $D_0 > 25 = \text{Alta}$ | Subrasante débil |
| 45 | 01+400 | Vuelta | 25,00 | 33,26 | 77,99 | $D_0 < 25 = \text{Baja}$ | Subrasante fuerte |
| 46 | 01+200 | Vuelta | 32,52 | 33,26 | 77,99 | $D_0 > 25 = \text{Alta}$ | Subrasante débil |
| 47 | 01+000 | Vuelta | 22,96 | 27,62 | 77,99 | $D_0 < 25 = \text{Baja}$ | Subrasante fuerte |
| 48 | 00+800 | Vuelta | 24,87 | 27,62 | 77,99 | $D_0 < 25 = \text{Baja}$ | Subrasante fuerte |
| 49 | 00+600 | Vuelta | 21,27 | 27,62 | 77,99 | $D_0 < 25 = \text{Baja}$ | Subrasante fuerte |
| 50 | 00+400 | Vuelta | 27,07 | 27,62 | 77,99 | $D_0 > 25 = \text{Alta}$ | Subrasante débil |
| 51 | 00+200 | Vuelta | 21,38 | 27,62 | 77,99 | $D_0 < 25 = \text{Baja}$ | Subrasante fuerte |
| 52 | 00+000 | Vuelta | 25,27 | 27,62 | 77,99 | $D_0 > 25 = \text{Alta}$ | Subrasante débil |

Fuente: Elaboración propia.

La deflexión máxima D_0 , es Baja cuando es menor a 25 (0,01mm), y es Alta cuando es superior a 25 (0,01mm), en cualquier caso, debe ser menor a la Dadm.

Tabla 3.4. Análisis de radios de curvatura del tramo

| Punto | Progresiva | Carril | RCmín | RCmáx | RC | RCc | Valoración | Conclusión |
|-------|------------|--------|-------|-------|--------|--------|--------------------------|------------------|
| N° | (Km) | | (m) | (m) | (m) | (m) | | |
| 1 | 00+000 | Ida | 80 | 600 | 521,78 | 919,48 | $RC > 350 = \text{Alta}$ | Pavimento fuerte |
| 2 | 00+200 | Ida | 80 | 600 | 391,34 | 919,48 | $RC > 350 = \text{Alta}$ | Pavimento fuerte |
| 3 | 00+400 | Ida | 80 | 600 | 782,67 | 919,48 | $RC > 350 = \text{Alta}$ | Pavimento fuerte |
| 4 | 00+600 | Ida | 80 | 600 | 786,93 | 919,48 | $RC > 350 = \text{Alta}$ | Pavimento fuerte |
| 5 | 00+800 | Ida | 80 | 600 | 786,93 | 919,48 | $RC > 350 = \text{Alta}$ | Pavimento fuerte |
| 6 | 01+000 | Ida | 80 | 600 | 524,62 | 919,48 | $RC > 350 = \text{Alta}$ | Pavimento fuerte |
| 7 | 01+200 | Ida | 80 | 600 | 524,62 | 868,67 | $RC > 350 = \text{Alta}$ | Pavimento fuerte |
| 8 | 01+400 | Ida | 80 | 600 | 524,62 | 868,67 | $RC > 350 = \text{Alta}$ | Pavimento fuerte |
| 9 | 01+600 | Ida | 80 | 600 | 786,93 | 868,67 | $RC > 350 = \text{Alta}$ | Pavimento fuerte |
| 10 | 01+800 | Ida | 80 | 600 | 524,62 | 868,67 | $RC > 350 = \text{Alta}$ | Pavimento fuerte |
| 11 | 02+000 | Ida | 80 | 600 | 791,19 | 868,67 | $RC > 350 = \text{Alta}$ | Pavimento fuerte |
| 12 | 02+200 | Ida | 80 | 600 | 791,19 | 966,10 | $RC > 350 = \text{Alta}$ | Pavimento fuerte |

| Punto | Progresiva | Carril | RCmín | RCmáx | RC | RCc | Valoración | Conclusión |
|-------|------------|--------|-------|-------|--------|--------|-----------------|------------------|
| N° | (Km) | | (m) | (m) | (m) | (m) | | |
| 13 | 02+400 | Ida | 80 | 600 | 791,19 | 966,10 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 14 | 02+600 | Ida | 80 | 600 | 527,46 | 966,10 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 15 | 02+800 | Ida | 80 | 600 | 791,19 | 966,10 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 16 | 03+000 | Ida | 80 | 600 | 395,60 | 966,10 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 17 | 03+200 | Ida | 80 | 600 | 226,06 | 319,77 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 18 | 03+400 | Ida | 80 | 600 | 316,48 | 319,77 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 19 | 03+600 | Ida | 80 | 600 | 263,73 | 319,77 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 20 | 03+800 | Ida | 80 | 600 | 263,73 | 319,77 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 21 | 04+000 | Ida | 80 | 600 | 263,73 | 319,77 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 22 | 04+200 | Ida | 80 | 600 | 197,80 | 337,33 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 23 | 04+400 | Ida | 80 | 600 | 316,48 | 337,33 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 24 | 04+600 | Ida | 80 | 600 | 176,77 | 337,33 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 25 | 04+800 | Ida | 80 | 600 | 265,15 | 337,33 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 26 | 05+000 | Ida | 80 | 600 | 265,15 | 337,33 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 27 | 05+000 | Vuelta | 80 | 600 | 319,89 | 522,84 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 28 | 04+800 | Vuelta | 80 | 600 | 319,89 | 522,84 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 29 | 04+600 | Vuelta | 80 | 600 | 266,57 | 522,84 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 30 | 04+400 | Vuelta | 80 | 600 | 533,14 | 522,84 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 31 | 04+200 | Vuelta | 80 | 600 | 319,89 | 522,84 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 32 | 04+000 | Vuelta | 80 | 600 | 399,86 | 413,73 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 33 | 03+800 | Vuelta | 80 | 600 | 266,57 | 413,73 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 34 | 03+600 | Vuelta | 80 | 600 | 321,59 | 413,73 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 35 | 03+400 | Vuelta | 80 | 600 | 200,99 | 413,73 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 36 | 03+200 | Vuelta | 80 | 600 | 229,71 | 413,73 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 37 | 03+000 | Vuelta | 80 | 600 | 401,99 | 439,15 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 38 | 02+800 | Vuelta | 80 | 600 | 323,30 | 439,15 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 39 | 02+600 | Vuelta | 80 | 600 | 323,30 | 439,15 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 40 | 02+400 | Vuelta | 80 | 600 | 404,12 | 439,15 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 41 | 02+200 | Vuelta | 80 | 600 | 270,83 | 439,15 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 42 | 02+000 | Vuelta | 80 | 600 | 406,25 | 447,89 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 43 | 01+800 | Vuelta | 80 | 600 | 406,25 | 447,89 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 44 | 01+600 | Vuelta | 80 | 600 | 270,83 | 447,89 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 45 | 01+400 | Vuelta | 80 | 600 | 270,83 | 447,89 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 46 | 01+200 | Vuelta | 80 | 600 | 326,70 | 447,89 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 47 | 01+000 | Vuelta | 80 | 600 | 408,38 | 580,40 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 48 | 00+800 | Vuelta | 80 | 600 | 326,70 | 580,40 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |
| 49 | 00+600 | Vuelta | 80 | 600 | 538,83 | 580,40 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 50 | 00+400 | Vuelta | 80 | 600 | 323,30 | 580,40 | RC < 350 = Baja | Pavimento débil |

| Punto | Progresiva | Carril | RCmín | RCmáx | RC | RCc | Valoración | Conclusión |
|-------|------------|--------|-------|-------|--------|--------|-----------------|------------------|
| N° | (Km) | | (m) | (m) | (m) | (m) | | |
| 51 | 00+200 | Vuelta | 80 | 600 | 401,99 | 580,40 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |
| 52 | 00+000 | Vuelta | 80 | 600 | 535,98 | 580,40 | RC > 350 = Alta | Pavimento fuerte |

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al radio de curvatura RC, es Baja cuando es menor a 300 (m), y es Alta cuando es superior a 350 (m), en cualquier caso, debe ser mayor a 80 m y menor a 600 m.

3.4. APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE HOGG

Para describir el procedimiento de cálculo del refuerzo que requiera o no el pavimento del tramo en estudio, se procede a desarrollar un ejemplo de la aplicación del modelo matemático de Hogg para la progresiva 01+000 km.

3.4.1. Datos preliminares de campo de la Progresiva 01+000:

| | |
|--------------------------|---|
| Deflexión máxima | $D_0 = 0,1191$ mm |
| Deflexión a 50 cm | $D_{50} = 0,0586$ mm |
| Carga en el eje trasero | $W_{18} = 18000$ libras |
| Carga sobre llanta doble | $P = 9000$ libras = 4082,4 kg |
| Carga sobre una llanta | $P' = 4500$ libras = 2041,2 kg |
| Presión de inflado | $p = 80$ psi = 5,625 kg/cm ² |
| Distancia de recorrido | $R = 50$ cm |
| Espesor del pavimento | $HC = 41$ cm |

3.4.2. Procedimiento de cálculos según modelo de Hogg

a) Cálculo de coeficientes para el modelo matemático de Hogg:

El modelo matemático de Hogg utiliza la siguiente nomenclatura:

$$D_{\phi} = D_0 = 0,1191 \text{ mm} = 0,01191 \text{ cm}$$

$$D_R = D_{50} = 0,0596 \text{ mm} = 0,00596 \text{ cm}$$

Cálculo de la relación D_R/D_{ϕ} :

$$\frac{D_R}{D_{\phi}} = \frac{0,0596 \text{ mm}}{0,1191 \text{ mm}} = 0,50$$

Para evaluación rutinaria se tienen los siguientes valores:

$$\mu = 0,40$$

$$\frac{H}{L_\phi} = 10$$

Con estos valores entramos a la siguiente tabla para obtener los coeficientes A, B y C:

Tabla 3.5. Coeficientes A, B, C para modelo matemático de Hogg.

| H/L_ϕ | μ | A | B | C |
|----------------------------|-----------------|----------|---|--------|
| ∞ | Cualquier valor | 3.115,00 | 0 | 0,583 |
| 10 $D_R/D_\phi > 0,7$ | 0,5 | 2.460,00 | 0 | 0,592 |
| 10 $D_R/D_\phi < 0,7$ | 0,5 | 371,10 | 2 | 0,219 |
| 10 $D_R/D_\phi > 0,426$ | 0,4 | 2.629,00 | 0 | 0,548 |
| 10 $D_R/D_\phi < 0,426$ | 0,4 | 2.283,40 | 3 | 0,2004 |

Fuente: Rivera Gómez, Flor. 2010

De donde se obtiene:

$$\mathbf{A = 2.629,00}$$

$$\mathbf{B = 0}$$

$$\mathbf{C = 0,548}$$

Luego de la siguiente tabla obtenemos los demás coeficientes X, Y, M, I, K, N:

Tabla 3.6. Coeficientes X, Y, M, I, K y N para modelo matemático de Hogg.

| H/L_ϕ | μ | X | Y | M | I | K | N |
|------------|-----------------|-------|-------|------|--------|-------|-----|
| 10 | 0,50 | 0,183 | 0,620 | 0,52 | 0,1614 | 1,5 | 10 |
| 10 | 0,40 | 0,192 | 0,602 | 0,48 | 0,1689 | 1,633 | 10 |
| ∞ | Cualquier valor | 0,180 | 0,525 | 0,44 | 0,1925 | - | 100 |

Fuente: Rivera Gómez, Flor. 2010

De donde se obtiene:

$$\begin{array}{ll} \mathbf{X = 0,192} & \mathbf{I = 0,1689} \\ \mathbf{Y = 0,602} & \mathbf{K = 1,633} \\ \mathbf{M = 0,48} & \mathbf{N = 10} \end{array}$$

b) Cálculos aplicando el modelo matemático de Hogg

Cálculo del área de contacto de la llanta con un radio A:

$$A_r = \sqrt{\frac{P'}{\pi * p}}$$

Donde:

A_r = Radio de la huella circular de contacto (cm)

P' = Carga sobre una llanta (libras)

p = Presión de inflado (psi)

$$A_r = \sqrt{\frac{4500}{\pi * 80} * 2,54}$$

$$\mathbf{A_r = 10,748 cm}$$

Cálculo de la distancia del centro geométrico de la llanta R5:

$$R5 = R \frac{A^c - B}{\left[A \left(\frac{D\phi}{DR} - 1 \right) \right]^c - B}$$

Donde:

R = Distancia a la que se mide la deflexión DR (cm)

$D\phi$ = Deflexión máxima (mm)

DR = Deflexión a la distancia R (mm)

A, B y C = Coeficientes cuyo valor se indica en la tabla 3.1.

$$R5 = 50 \text{ cm} \frac{2629^{0,538} - 0}{\left[2629\left(\frac{0,1191}{0,0596} - 1\right)\right]^{0,548} - 0}$$

$$\mathbf{R5 = 50,046 \text{ cm}}$$

Cálculo de la longitud elástica $L\phi$:

$$L\phi = \frac{Y * R5 + \sqrt{(Y * R5)^2 - 4 * A * X * R5}}{2}$$

Donde:

R5 = Distancia del centro geométrico de la llanta (cm)

Ar = Radio de la huella circular de carga (cm)

X, Y = Coeficiente de correlación cuyo valor se indica en la tabla 3.2.

$$L\phi = \frac{0,602 * 50,046 + \sqrt{(0,602 * 50,046)^2 - 4 * 10,748 * 0,192 * 50,046}}{2}$$

$$\mathbf{L\phi = 26,183 \text{ cm}}$$

La relación teórica de la rigidez de la carga puntual entre carga distribuida se calcula por medio de la ecuación:

$$\frac{S_o}{S} = 1 - M * \left(\frac{A_r}{L\phi} - 0,10\right)$$

Donde:

So = Rigidez para carga puntual

S = Rigidez para carga de área

M = Coeficiente numérico de tabla 3.2.

$$\frac{S_o}{S} = 1 - 0,48 * \left(\frac{10,748}{26,183} - 0,10\right)$$

$$\frac{S_o}{S} = 0,851$$

Cálculo el módulo de elasticidad de la subrasante por medio de la siguiente ecuación:

$$E_{\phi} = \frac{K * I * P}{L_{\phi} * D_{\phi}} * \frac{S_o}{S}$$

Donde:

K, I, P = Coeficientes numéricos ver tabla 3.2.

P = Carga total en la llanta doble

L_{ϕ} = Longitud elástica

D_{ϕ} = Deflexión medida máxima

$$E_{\phi} = \frac{1,633 * 0,1689 * 4082,4}{26,183 * 0,01191} * 0,851$$

$$E_{\phi} = 3.072,60 \text{ kg/cm}^2$$

Luego, para determinar el módulo de elasticidad del pavimento, calculamos los siguientes valores:

$$r = 1,5 * A_r$$

$$r = 1,5 * 10,748$$

$$r = 16,122 \text{ cm}$$

$$Z1 = HC + 0,6 * \left(\frac{A_r^2}{HC} \right)$$

$$Z1 = 41 + 0,6 * \left(\frac{10,748^2}{41} \right)$$

$$Z1 = 42,690 \text{ cm}$$

$$R1 = \sqrt{(Z1)^2 + (1,5 * A_r)^2}$$

$$R1 = \sqrt{(42,690)^2 + (1,5 * 10,748)^2}$$

$$R1 = 45,633 \text{ cm}$$

El espesor equivalente se determina con la siguiente ecuación:

$$HE = 0,9 * HC * \left(\frac{E^*}{E_{\phi}}\right)^{1/3}$$

$$HE = 0,9 * 41 * \left(\frac{E^*}{3072,60}\right)^{1/3}$$

HE = en función a cualquier valor de E*

Estas ecuaciones se resuelven iterativamente en Excel, para determinar el valor de HE.
(Rivera Gómez, Flor. 2010)

Las siguientes ecuaciones están, una en función de la otra, las mismas que servirán para determinar el módulo de elasticidad del pavimento E* (iterado)

$$Z2 = HE + 0.6 * \left(\frac{A_r^2}{HE}\right)$$

$$Z2 = HE + 0.6 * \left(\frac{10,748^2}{HE}\right)$$

$$Z2 = HE + \left(\frac{69,31}{HE}\right)$$

Z2 = en función del resultado HE

$$R2 = \sqrt{(Z2)^2 + (1,5 * A_r)^2}$$

$$R2 = \sqrt{\left(HE + \left(\frac{69,31}{HE}\right)\right)^2 + (1,5 * 10,748)^2}$$

R2 = en función del resultado HE

$$Z3 = (HE + N * L_{\phi}) + 0,6 * \left(\frac{A_r^2}{HE + NL_{\phi}}\right)$$

$$Z3 = (HE + 10 * 26,183) + 0,6 * \left(\frac{10,748^2}{HE + 10 * 26,183}\right)$$

$$Z3 = (HE + 260,183) + \left(\frac{69,31}{HE + 260,183} \right)$$

$Z3 = \text{en función del resultado } HE$

$$R3 = \sqrt{(Z3)^2 + (1,5 * A_r)^2}$$

$$R3 = \sqrt{\left((HE + 260,183) + \left(\frac{69,31}{HE + 260,183} \right) \right)^2 + (1,5 * 10,748)^2}$$

$R3 = \text{en función del resultado } HE$

Determinación del Módulo de elasticidad equivalente del pavimento E^* , se resuelve introduciendo cualquier valor de E^* hasta igualar con la deflexión máxima determinada en el punto de estudio:

$$D_\phi = \frac{(1 + \mu)P'}{2\pi} \left\{ \frac{1}{E^*} \left[\frac{2(1 - \mu)}{1,5 * A_r} - \frac{1}{R1} \left(2(1 - \mu) + \left(\frac{Z1}{R1} \right)^2 \right) \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{E_\phi} \left[\frac{1}{R2} \left(2(1 - \mu) + \left(\frac{Z2}{R2} \right)^2 \right) \right] - \frac{1}{R3} \left(2(1 - \mu) + \left(\frac{Z3}{R3} \right)^2 \right) \right\}$$

$$D_\phi = \frac{(1 + 0,4) * 2041,2}{2\pi} \left\{ \frac{1}{E^*} \left[\frac{2 * (1 - 0,4)}{1,5 * 10,748} - \frac{1}{45,633} \left(2(1 - 0,4) + \left(\frac{42,690}{45,633} \right)^2 \right) \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{2657,85} \left[\frac{1}{R2} \left(2(1 - 0,4) + \left(\frac{Z2}{R2} \right)^2 \right) \right] \right. \\ \left. - \frac{1}{R3} \left(2(1 - 0,4) + \left(\frac{Z3}{R3} \right)^2 \right) \right\}$$

Para:

$$E^* = 3.707,00 \text{ kg/cm}^2$$

Se obtiene:

$$D_\phi = 0,1191 \text{ mm (resultado iterado)} = 0,1191 \text{ mm (resultado de campo)}$$

Por tanto, reemplazando:

$$HE = 0,9 * HC * \left(\frac{E^*}{E_{\phi}}\right)^{1/3}$$

$$HE = 0,9 * 41 * \left(\frac{E^*}{3072,60}\right)^{1/3}$$

$$\mathbf{HE = 39,282 \text{ cm}}$$

c) Cálculos del CBR de la subrasante según modelo de Hogg

Se determina el CBR de la subrasante, con la siguiente fórmula:

$$E_{\phi} = f * CBR$$

$$CBR = \frac{f}{E_{\phi}}$$

Donde:

CBR = Capacidad soporte del suelo de la subrasante (%)

f = Factor de CBR, valor entre 100-160, se recomienda utilizar para ensayos rutinarios un factor de 110. Se debe justificar en caso de cambiar este valor.

E_{ϕ} = Módulo de elasticidad de la subrasante (kg/cm^2)

$$CBR = \frac{110}{3072,60}$$

$$\mathbf{CBR = 27,93 \%}$$

d) Cálculo del Refuerzo Estructural de la subrasante según modelo de Hogg

Determinación del espesor del pavimento HEQ:

$$HEQ = HC * \left(\frac{1}{3} * \frac{E^*}{E_{\phi}}\right)^{1/3}$$

$$HEQ = 41 * \left(\frac{1}{3} * \frac{3707,00}{3071,60}\right)^{1/3}$$

$$\mathbf{HEQ = 30,26 \text{ cm}}$$

Luego determinamos el espesor requerido de diseño HD:

$$HD = CBR^{-0,59} * (4,63 + 6,09 * \log N_{18})$$

Donde:

N_{18} = Carga Equivalente = 1.570.500 klb (valor de diseño)

CBR = Capacidad soporte del suelo de la subrasante (%)

$$HD = 27,93^{-0,59} * (4,63 + 6,09 * \log 1.570.500,00)$$

$$HD = 15,09 \text{ cm}$$

Finalmente se determina el refuerzo del pavimento DH:

$$DH = HD - HEQ$$

$$DH = 15,09 \text{ cm} - 30,26 \text{ cm}$$

$$DH = -15,18 \text{ cm}$$

e) Resultado final

En la progresiva 01+000, al obtener como resultado un refuerzo del pavimento negativo, entonces en esta progresiva no se necesita refuerzo estructural, porque el espesor del pavimento debía ser 30,26 cm, sin embargo, según información del proyecto, el tramo tiene un espesor de 41,00 cm.

3.4.3. Resultados obtenidos del modelo matemático de Hogg de todo el tramo

Tabla 3.7. Resultados obtenidos del modelo de Hoog en el carril de ida.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | EØ (Kg/cm²) | E* (Kg/cm²) | CBR (%) | Requerimiento de refuerzo DH (cm) | Observaciones |
|----------|-----------------|--------|-------------|-------------|---------|-----------------------------------|----------------------|
| 1 | 00+000 | Ida | 2.266,44 | 3.184,00 | 20,60 | -13,78 | No requiere refuerzo |
| 2 | 00+200 | Ida | 2.291,95 | 2.766,00 | 20,84 | -12,33 | No requiere refuerzo |
| 3 | 00+400 | Ida | 2.146,00 | 3.765,00 | 19,51 | -15,64 | No requiere refuerzo |
| 4 | 00+600 | Ida | 1.309,88 | 2.875,00 | 11,91 | -11,99 | No requiere refuerzo |
| 5 | 00+800 | Ida | 1.072,70 | 2.570,00 | 9,75 | -9,97 | No requiere refuerzo |

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | EØ (Kg/cm²) | E* (Kg/cm²) | CBR (%) | Requerimiento de refuerzo DH (cm) | Observaciones |
|-----------------|------------------------|---------------|--------------------|--------------------|----------------|--|----------------------|
| 6 | 01+000 | Ida | 3.072,60 | 3.707,00 | 27,93 | -15,18 | No requiere refuerzo |
| 7 | 01+200 | Ida | 2.281,24 | 3.201,00 | 20,74 | -13,84 | No requiere refuerzo |
| 8 | 01+400 | Ida | 1.779,19 | 2.819,00 | 16,17 | -12,31 | No requiere refuerzo |
| 9 | 01+600 | Ida | 900,56 | 2.324,00 | 8,19 | -7,87 | No requiere refuerzo |
| 10 | 01+800 | Ida | 1.779,19 | 2.819,00 | 16,17 | -12,31 | No requiere refuerzo |
| 11 | 02+000 | Ida | 669,18 | 1.967,00 | 6,08 | -3,64 | No requiere refuerzo |
| 12 | 02+200 | Ida | 1.079,15 | 2.583,00 | 9,81 | -10,05 | No requiere refuerzo |
| 13 | 02+400 | Ida | 772,50 | 2.136,00 | 7,02 | -5,83 | No requiere refuerzo |
| 14 | 02+600 | Ida | 1.447,08 | 2.533,00 | 13,16 | -10,73 | No requiere refuerzo |
| 15 | 02+800 | Ida | 904,37 | 2.337,00 | 8,22 | -7,96 | No requiere refuerzo |
| 16 | 03+000 | Ida | 2.318,05 | 2.795,00 | 21,07 | -12,44 | No requiere refuerzo |
| 17 | 03+200 | Ida | 820,01 | 1.257,00 | 7,45 | 0,11 | Requiere refuerzo |
| 18 | 03+400 | Ida | 696,58 | 1.349,00 | 6,33 | 0,78 | Requiere refuerzo |
| 19 | 03+600 | Ida | 600,96 | 1.145,30 | 5,46 | 4,27 | Requiere refuerzo |
| 20 | 03+800 | Ida | 723,65 | 1.268,00 | 6,58 | 1,14 | Requiere refuerzo |
| 21 | 04+000 | Ida | 657,72 | 1.273,00 | 5,98 | 2,04 | Requiere refuerzo |
| 22 | 04+200 | Ida | 755,60 | 1.130,00 | 6,87 | 2,01 | Requiere refuerzo |
| 23 | 04+400 | Ida | 631,13 | 1.277,30 | 5,74 | 2,43 | Requiere refuerzo |
| 24 | 04+600 | Ida | 768,44 | 1.078,50 | 6,99 | 2,35 | Requiere refuerzo |
| 25 | 04+800 | Ida | 660,95 | 1.209,30 | 6,01 | 2,59 | Requiere refuerzo |
| 26 | 05+000 | Ida | 604,29 | 1.151,50 | 5,49 | 4,14 | Requiere refuerzo |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.8. Resultados obtenidos del modelo de Hoog en el carril de vuelta.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | EØ (Kg/cm²) | E* (Kg/cm²) | CBR (%) | Requerimiento de refuerzo DH (cm) | Observaciones |
|-----------------|------------------------|---------------|--------------------|--------------------|----------------|--|----------------------|
| 27 | 05+000 | Vuelta | 581,19 | 1.226,50 | 5,28 | 3,84 | Requiere refuerzo |
| 28 | 04+800 | Vuelta | 637,74 | 1.291,00 | 5,80 | 2,19 | Requiere refuerzo |
| 29 | 04+600 | Vuelta | 607,65 | 1.157,60 | 5,52 | 4,01 | Requiere refuerzo |
| 30 | 04+400 | Vuelta | 547,49 | 1.481,50 | 4,98 | 2,13 | Requiere refuerzo |
| 31 | 04+200 | Vuelta | 703,91 | 1.363,50 | 6,40 | 0,56 | Requiere refuerzo |
| 32 | 04+000 | Vuelta | 497,75 | 1.240,40 | 4,53 | 5,62 | Requiere refuerzo |
| 33 | 03+800 | Vuelta | 557,91 | 1.105,30 | 5,07 | 5,58 | Requiere refuerzo |
| 34 | 03+600 | Vuelta | 535,24 | 1.174,30 | 4,87 | 5,37 | Requiere refuerzo |
| 35 | 03+400 | Vuelta | 701,64 | 1.096,00 | 6,38 | 3,08 | Requiere refuerzo |
| 36 | 03+200 | Vuelta | 754,73 | 1.213,00 | 6,86 | 1,24 | Requiere refuerzo |
| 37 | 03+000 | Vuelta | 669,14 | 1.467,50 | 6,08 | 0,15 | Requiere refuerzo |
| 38 | 02+800 | Vuelta | 1.003,92 | 1.657,50 | 9,13 | -4,41 | No requiere refuerzo |
| 39 | 02+600 | Vuelta | 887,34 | 1.552,20 | 8,07 | -2,86 | No requiere refuerzo |
| 40 | 02+400 | Vuelta | 672,36 | 1.475,50 | 6,11 | 0,04 | Requiere refuerzo |
| 41 | 02+200 | Vuelta | 1.356,59 | 1.773,00 | 12,33 | -6,64 | No requiere refuerzo |
| 42 | 02+000 | Vuelta | 1.115,39 | 1.950,00 | 10,14 | -6,81 | No requiere refuerzo |
| 43 | 01+800 | Vuelta | 850,37 | 1.684,50 | 7,73 | -3,51 | No requiere refuerzo |
| 44 | 01+600 | Vuelta | 1.034,54 | 1.547,00 | 9,40 | -3,83 | No requiere refuerzo |
| 45 | 01+400 | Vuelta | 1.356,59 | 1.773,00 | 12,33 | -6,64 | No requiere refuerzo |
| 46 | 01+200 | Vuelta | 719,00 | 1.392,50 | 6,54 | 0,11 | Requiere refuerzo |
| 47 | 01+000 | Vuelta | 1.121,22 | 1.960,50 | 10,19 | -6,90 | No requiere refuerzo |
| 48 | 00+800 | Vuelta | 1.161,45 | 1.798,00 | 10,56 | -6,10 | No requiere refuerzo |
| 49 | 00+600 | Vuelta | 1.040,41 | 2.137,00 | 9,46 | -7,55 | No requiere refuerzo |
| 50 | 00+400 | Vuelta | 1.003,92 | 1.657,40 | 9,13 | -4,41 | No requiere refuerzo |
| 51 | 00+200 | Vuelta | 1.290,26 | 2.097,00 | 11,73 | -8,25 | No requiere refuerzo |
| 52 | 00+000 | Vuelta | 779,35 | 1.813,00 | 7,09 | -3,77 | No requiere refuerzo |

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. RESUMEN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de Hogg, se detallan en las siguientes tablas:

Tabla 4.1. Resumen de resultados obtenidos en el carril de ida.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | D0 = DØ (0,01mm) | D50 = DR (0,01mm) | EØ (Kg/cm²) | E* (Kg/cm²) | CBR (%) | DH (cm) | Observaciones |
|----------|-----------------|--------|------------------|-------------------|-------------|-------------|---------|---------|----------------------|
| 1 | 00+000 | Ida | 13,97 | 7,99 | 2.266,44 | 3.184,00 | 20,60 | -13,78 | No requiere refuerzo |
| 2 | 00+200 | Ida | 15,97 | 7,99 | 2.291,95 | 2.766,00 | 20,84 | -12,33 | No requiere refuerzo |
| 3 | 00+400 | Ida | 11,98 | 7,99 | 2.146,00 | 3.765,00 | 19,51 | -15,64 | No requiere refuerzo |
| 4 | 00+600 | Ida | 15,88 | 11,91 | 1.309,88 | 2.875,00 | 11,91 | -11,99 | No requiere refuerzo |
| 5 | 00+800 | Ida | 17,87 | 13,90 | 1.072,70 | 2.570,00 | 9,75 | -9,97 | No requiere refuerzo |
| 6 | 01+000 | Ida | 11,91 | 5,96 | 3.072,60 | 3.707,00 | 27,93 | -15,18 | No requiere refuerzo |
| 7 | 01+200 | Ida | 13,90 | 7,94 | 2.281,24 | 3.201,00 | 20,74 | -13,84 | No requiere refuerzo |
| 8 | 01+400 | Ida | 15,88 | 9,93 | 1.779,19 | 2.819,00 | 16,17 | -12,31 | No requiere refuerzo |
| 9 | 01+600 | Ida | 19,86 | 15,88 | 900,56 | 2.324,00 | 8,19 | -7,87 | No requiere refuerzo |
| 10 | 01+800 | Ida | 15,88 | 9,93 | 1.779,19 | 2.819,00 | 16,17 | -12,31 | No requiere refuerzo |
| 11 | 02+000 | Ida | 23,70 | 19,75 | 669,18 | 1.967,00 | 6,08 | -3,64 | No requiere refuerzo |
| 12 | 02+200 | Ida | 17,77 | 13,82 | 1.079,15 | 2.583,00 | 9,81 | -10,05 | No requiere refuerzo |
| 13 | 02+400 | Ida | 21,72 | 17,77 | 772,50 | 2.136,00 | 7,02 | -5,83 | No requiere refuerzo |
| 14 | 02+600 | Ida | 17,77 | 11,85 | 1.447,08 | 2.533,00 | 13,16 | -10,73 | No requiere refuerzo |
| 15 | 02+800 | Ida | 19,75 | 15,80 | 904,37 | 2.337,00 | 8,22 | -7,96 | No requiere refuerzo |
| 16 | 03+000 | Ida | 15,80 | 7,90 | 2.318,05 | 2.795,00 | 21,07 | -12,44 | No requiere refuerzo |
| 17 | 03+200 | Ida | 35,55 | 21,72 | 820,01 | 1.257,00 | 7,45 | 0,11 | Requiere refuerzo |
| 18 | 03+400 | Ida | 33,57 | 23,70 | 696,58 | 1.349,00 | 6,33 | 0,78 | Requiere refuerzo |
| 19 | 03+600 | Ida | 39,50 | 27,65 | 600,96 | 1.145,30 | 5,46 | 4,27 | Requiere refuerzo |
| 20 | 03+800 | Ida | 35,55 | 23,70 | 723,65 | 1.268,00 | 6,58 | 1,14 | Requiere refuerzo |
| 21 | 04+000 | Ida | 37,52 | 25,67 | 657,72 | 1.273,00 | 5,98 | 2,04 | Requiere refuerzo |
| 22 | 04+200 | Ida | 39,50 | 23,70 | 755,60 | 1.130,00 | 6,87 | 2,01 | Requiere refuerzo |
| 23 | 04+400 | Ida | 35,55 | 25,67 | 631,13 | 1.277,30 | 5,74 | 2,43 | Requiere refuerzo |
| 24 | 04+600 | Ida | 41,25 | 23,57 | 768,44 | 1.078,50 | 6,99 | 2,35 | Requiere refuerzo |
| 25 | 04+800 | Ida | 37,32 | 25,54 | 660,95 | 1.209,30 | 6,01 | 2,59 | Requiere refuerzo |
| 26 | 05+000 | Ida | 39,29 | 27,50 | 604,29 | 1.151,50 | 5,49 | 4,14 | Requiere refuerzo |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2. Resumen de resultados obtenidos en el carril de vuelta.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | D0 = DØ (0,01mm) | D50 = DR (0,01mm) | EØ (Kg/cm²) | E* (Kg/cm²) | CBR (%) | DH (cm) | Observaciones |
|----------|-----------------|--------|------------------|-------------------|-------------|-------------|---------|---------|----------------------|
| 27 | 05+000 | Vuelta | 37,12 | 27,35 | 581,19 | 1.226,50 | 5,28 | 3,84 | Requiere refuerzo |
| 28 | 04+800 | Vuelta | 35,17 | 25,40 | 637,74 | 1.291,00 | 5,80 | 2,19 | Requiere refuerzo |
| 29 | 04+600 | Vuelta | 39,08 | 27,35 | 607,65 | 1.157,60 | 5,52 | 4,01 | Requiere refuerzo |
| 30 | 04+400 | Vuelta | 31,26 | 25,40 | 547,49 | 1.481,50 | 4,98 | 2,13 | Requiere refuerzo |
| 31 | 04+200 | Vuelta | 33,21 | 23,45 | 703,91 | 1.363,50 | 6,40 | 0,56 | Requiere refuerzo |
| 32 | 04+000 | Vuelta | 37,12 | 29,31 | 497,75 | 1.240,40 | 4,53 | 5,62 | Requiere refuerzo |
| 33 | 03+800 | Vuelta | 41,03 | 29,31 | 557,91 | 1.105,30 | 5,07 | 5,58 | Requiere refuerzo |
| 34 | 03+600 | Vuelta | 38,87 | 29,15 | 535,24 | 1.174,30 | 4,87 | 5,37 | Requiere refuerzo |
| 35 | 03+400 | Vuelta | 40,81 | 25,27 | 701,64 | 1.096,00 | 6,38 | 3,08 | Requiere refuerzo |
| 36 | 03+200 | Vuelta | 36,93 | 23,32 | 754,73 | 1.213,00 | 6,86 | 1,24 | Requiere refuerzo |
| 37 | 03+000 | Vuelta | 31,10 | 23,32 | 669,14 | 1.467,50 | 6,08 | 0,15 | Requiere refuerzo |
| 38 | 02+800 | Vuelta | 27,07 | 17,40 | 1.003,92 | 1.657,50 | 9,13 | -4,41 | No requiere refuerzo |
| 39 | 02+600 | Vuelta | 29,00 | 19,33 | 887,34 | 1.552,20 | 8,07 | -2,86 | No requiere refuerzo |
| 40 | 02+400 | Vuelta | 30,93 | 23,20 | 672,36 | 1.475,50 | 6,11 | 0,04 | Requiere refuerzo |
| 41 | 02+200 | Vuelta | 25,00 | 13,46 | 1.356,59 | 1.773,00 | 12,33 | -6,64 | No requiere refuerzo |
| 42 | 02+000 | Vuelta | 23,08 | 15,38 | 1.115,39 | 1.950,00 | 10,14 | -6,81 | No requiere refuerzo |
| 43 | 01+800 | Vuelta | 26,92 | 19,23 | 850,37 | 1.684,50 | 7,73 | -3,51 | No requiere refuerzo |
| 44 | 01+600 | Vuelta | 28,85 | 17,31 | 1.034,54 | 1.547,00 | 9,40 | -3,83 | No requiere refuerzo |
| 45 | 01+400 | Vuelta | 25,00 | 13,46 | 1.356,59 | 1.773,00 | 12,33 | -6,64 | No requiere refuerzo |
| 46 | 01+200 | Vuelta | 32,52 | 22,96 | 719,00 | 1.392,50 | 6,54 | 0,11 | Requiere refuerzo |
| 47 | 01+000 | Vuelta | 22,96 | 15,30 | 1.121,22 | 1.960,50 | 10,19 | -6,90 | No requiere refuerzo |
| 48 | 00+800 | Vuelta | 24,87 | 15,30 | 1.161,45 | 1.798,00 | 10,56 | -6,10 | No requiere refuerzo |
| 49 | 00+600 | Vuelta | 21,27 | 15,47 | 1.040,41 | 2.137,00 | 9,46 | -7,55 | No requiere refuerzo |
| 50 | 00+400 | Vuelta | 27,07 | 17,40 | 1.003,92 | 1.657,40 | 9,13 | -4,41 | No requiere refuerzo |
| 51 | 00+200 | Vuelta | 21,38 | 13,60 | 1.290,26 | 2.097,00 | 11,73 | -8,25 | No requiere refuerzo |
| 52 | 00+000 | Vuelta | 25,27 | 19,43 | 779,35 | 1.813,00 | 7,09 | -3,77 | No requiere refuerzo |

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1. Criterios de análisis de resultados según modelo matemático de Hogg

Como se observan los resultados, existen progresivas que tienen como DH valores negativos y otros con valores positivos. Según el modelo matemático de Hogg los valores negativos reflejan que existe un sobre dimensionamiento del paquete estructural, por tanto, no requiere refuerzo de carpeta asfáltica; sin embargo, los valores positivos reflejan que hay un déficit de paquete estructural por tanto requiere refuerzo de carpeta asfáltica para mitigar las fallas graves que presenta o que puede presentar el tramo en estudio.

4.2. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE HOGG

4.2.1. Análisis de deflexión máxima D_0

Los resultados obtenidos para ambos carriles son:

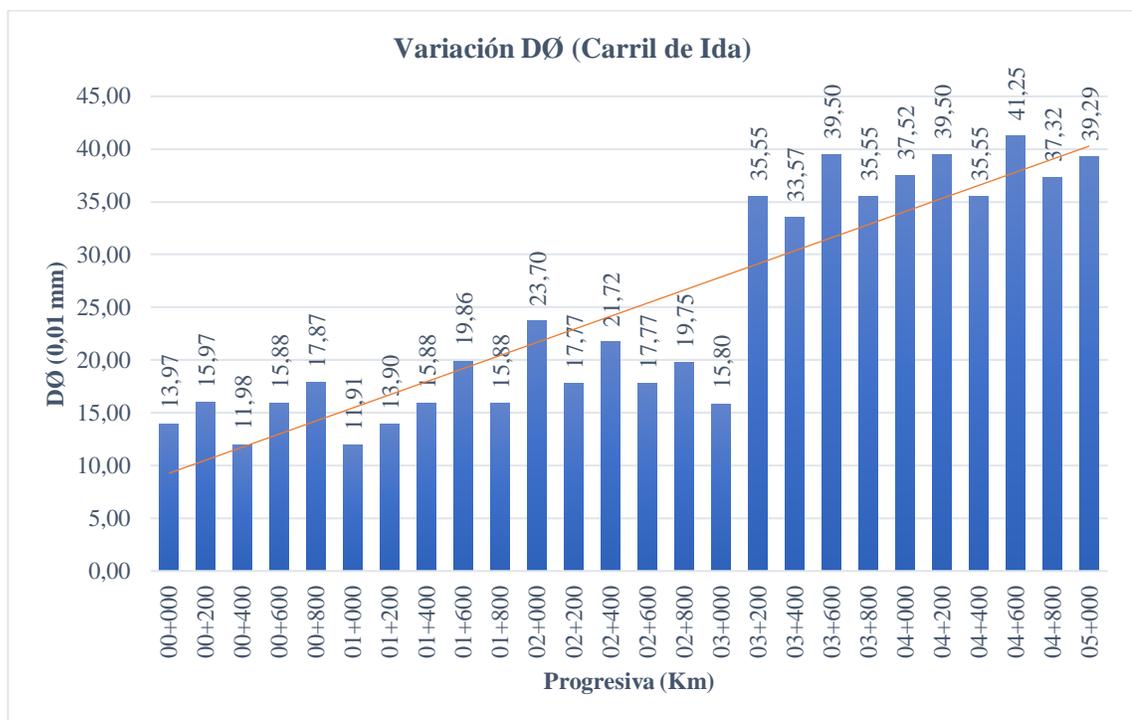
Tabla 4.3. Resultados de deflexión máxima D_0 de ambos carriles.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | $D_0 = D_0$ (0,01mm) | Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | $D_0 = D_0$ (0,01mm) |
|----------|-----------------|--------|----------------------|----------|-----------------|--------|----------------------|
| 1 | 00+000 | Ida | 13,97 | 27 | 05+000 | Vuelta | 37,12 |
| 2 | 00+200 | Ida | 15,97 | 28 | 04+800 | Vuelta | 35,17 |
| 3 | 00+400 | Ida | 11,98 | 29 | 04+600 | Vuelta | 39,08 |
| 4 | 00+600 | Ida | 15,88 | 30 | 04+400 | Vuelta | 31,26 |
| 5 | 00+800 | Ida | 17,87 | 31 | 04+200 | Vuelta | 33,21 |
| 6 | 01+000 | Ida | 11,91 | 32 | 04+000 | Vuelta | 37,12 |
| 7 | 01+200 | Ida | 13,90 | 33 | 03+800 | Vuelta | 41,03 |
| 8 | 01+400 | Ida | 15,88 | 34 | 03+600 | Vuelta | 38,87 |
| 9 | 01+600 | Ida | 19,86 | 35 | 03+400 | Vuelta | 40,81 |
| 10 | 01+800 | Ida | 15,88 | 36 | 03+200 | Vuelta | 36,93 |
| 11 | 02+000 | Ida | 23,70 | 37 | 03+000 | Vuelta | 31,10 |
| 12 | 02+200 | Ida | 17,77 | 38 | 02+800 | Vuelta | 27,07 |
| 13 | 02+400 | Ida | 21,72 | 39 | 02+600 | Vuelta | 29,00 |
| 14 | 02+600 | Ida | 17,77 | 40 | 02+400 | Vuelta | 30,93 |
| 15 | 02+800 | Ida | 19,75 | 41 | 02+200 | Vuelta | 25,00 |
| 16 | 03+000 | Ida | 15,80 | 42 | 02+000 | Vuelta | 23,08 |
| 17 | 03+200 | Ida | 35,55 | 43 | 01+800 | Vuelta | 26,92 |
| 18 | 03+400 | Ida | 33,57 | 44 | 01+600 | Vuelta | 28,85 |

| | | | | | | | |
|----|--------|-----|-------|----|--------|--------|-------|
| 19 | 03+600 | Ida | 39,50 | 45 | 01+400 | Vuelta | 25,00 |
| 20 | 03+800 | Ida | 35,55 | 46 | 01+200 | Vuelta | 32,52 |
| 21 | 04+000 | Ida | 37,52 | 47 | 01+000 | Vuelta | 22,96 |
| 22 | 04+200 | Ida | 39,50 | 48 | 00+800 | Vuelta | 24,87 |
| 23 | 04+400 | Ida | 35,55 | 49 | 00+600 | Vuelta | 21,27 |
| 24 | 04+600 | Ida | 41,25 | 50 | 00+400 | Vuelta | 27,07 |
| 25 | 04+800 | Ida | 37,32 | 51 | 00+200 | Vuelta | 21,38 |
| 26 | 05+000 | Ida | 39,29 | 52 | 00+000 | Vuelta | 25,27 |

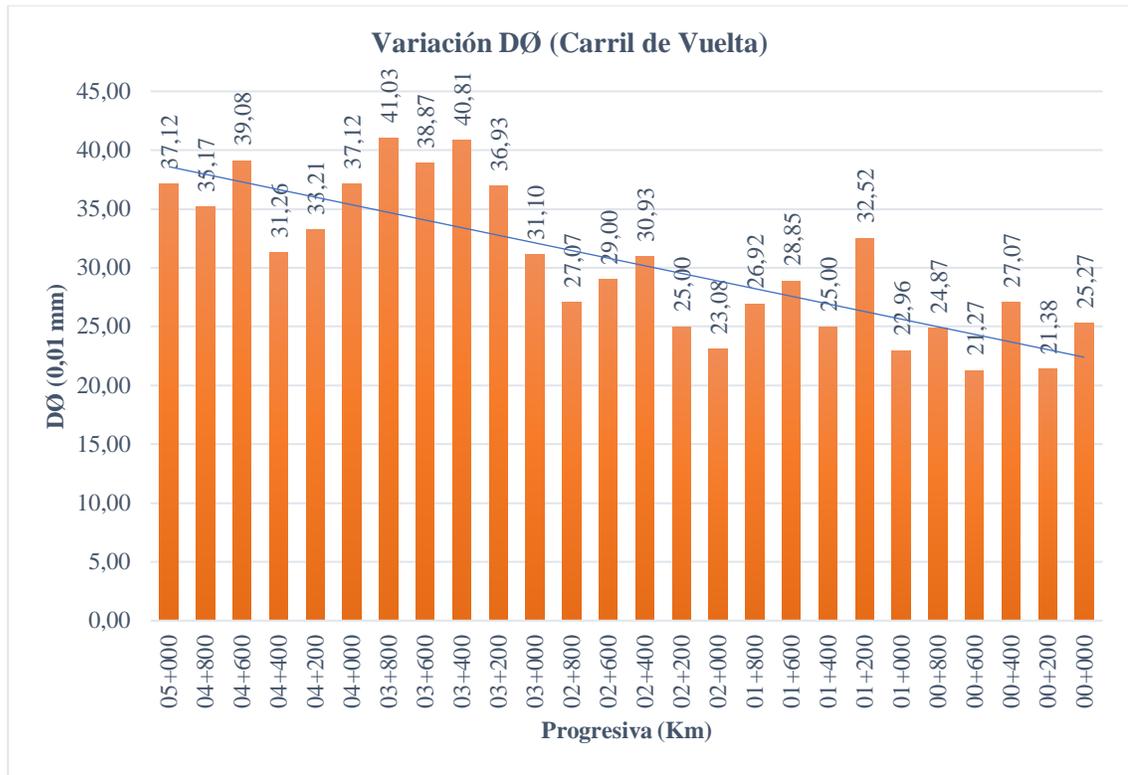
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.1. Variación D_{\emptyset} (carril de ida).



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.1. se observa que los resultados de deflexión máxima D_{\emptyset} del carril de ida, varían en algunas progresivas; desde la progresiva 00+000 a 03+000, los valores están entre 11,91 de 0,01mm a 23,70 de 0,01mm; sin embargo, desde la progresiva 03+200 a 05+000 los resultados son más altos porque están entre 33,57 de 0,01mm y 41,25 de 0,01mm, esto significa que existe un quiebre de resultados dividido en dos bandos que puede ser por varios motivos aún no detectados.

Gráfica 4.2. Variación D_{\emptyset} (carril de vuelta).

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.2. se observa que los resultados de deflexión máxima D_{\emptyset} del carril de vuelta, varían en algunas progresivas; desde la progresiva 05+000 a 03+000, los valores están entre 31,10 de 0,01mm a 41,03 de 0,01mm; sin embargo, desde la progresiva 02+800 a 00+000 los resultados son más bajos porque están entre 21,27 de 0,01mm y 30,93 de 0,01mm, a excepción de la progresiva 01+200 que se dispara su valor a 32,52 de 0,01mm, esto significa que existe un quiebre de resultados dividido en dos bandos que puede ser por varios motivos aún no detectados.

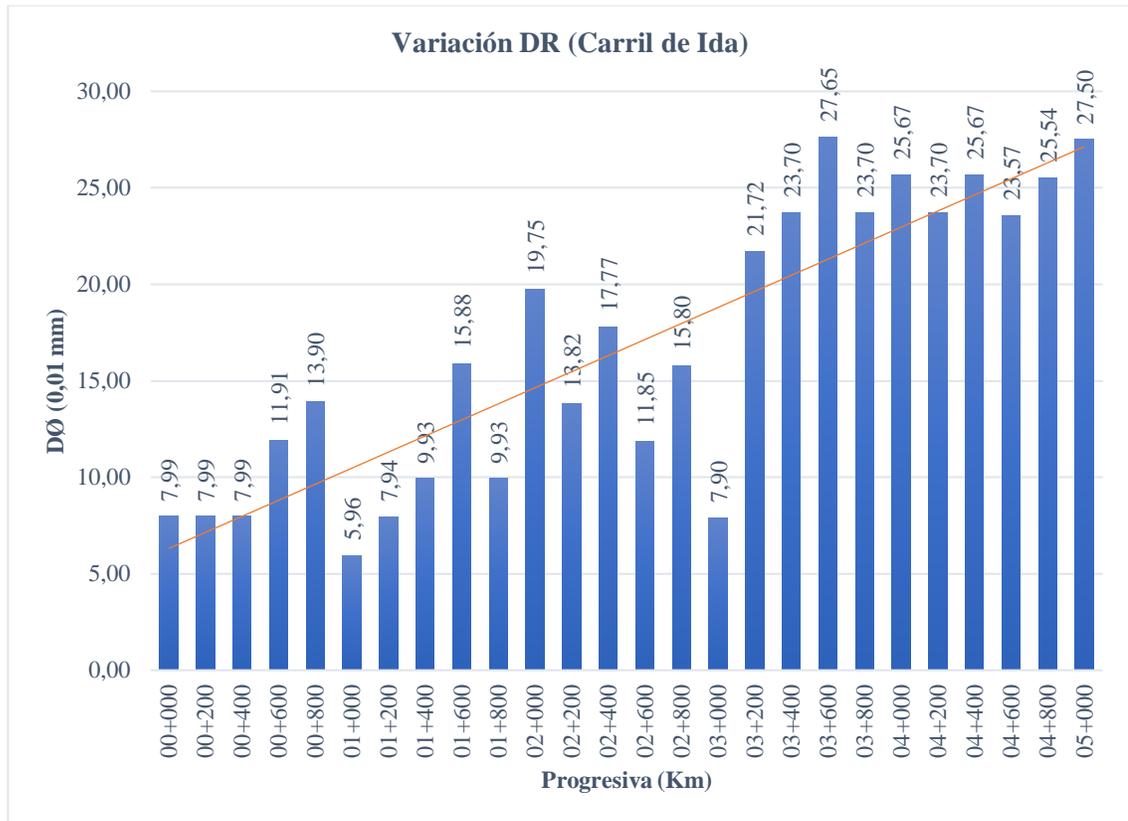
4.2.2. Análisis de la deflexión a 50 cm D_R

Los resultados obtenidos para ambos carriles son:

Tabla 4.4. Resultados de deflexión D_R de ambos carriles.

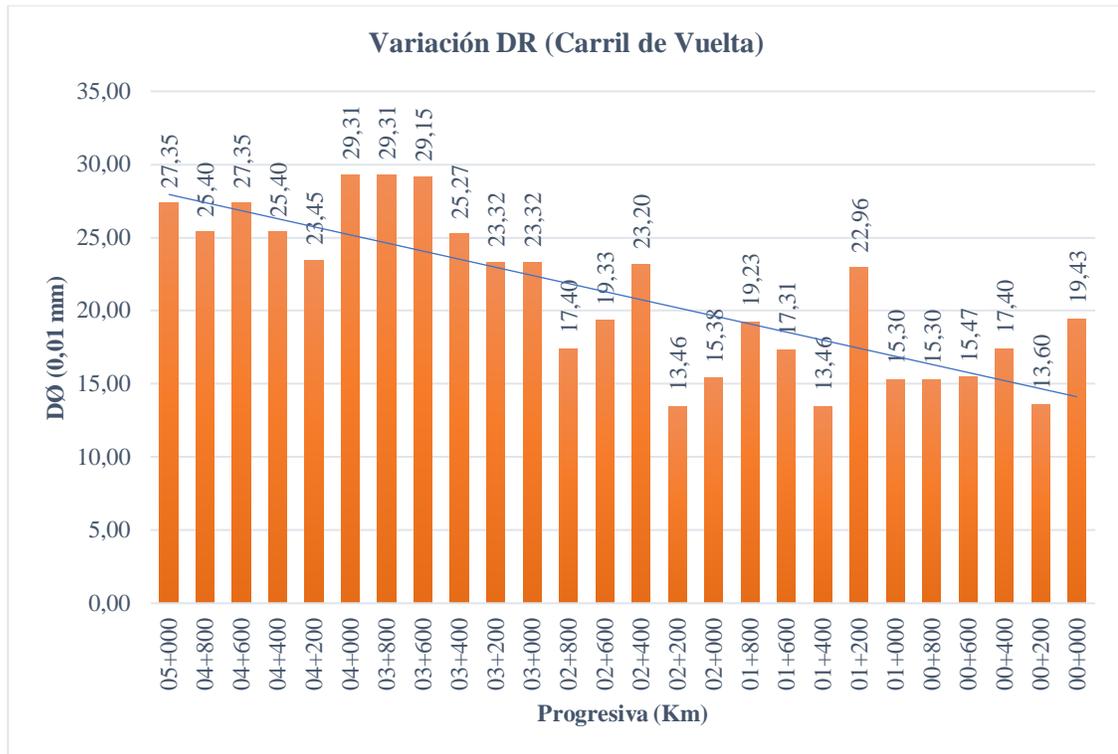
| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | D50 = DR (0,01mm) | Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | D50 = DR (0,01mm) |
|----------|-----------------|--------|-------------------|----------|-----------------|--------|-------------------|
| 1 | 00+000 | Ida | 7,99 | 27 | 05+000 | Vuelta | 27,35 |
| 2 | 00+200 | Ida | 7,99 | 28 | 04+800 | Vuelta | 25,40 |
| 3 | 00+400 | Ida | 7,99 | 29 | 04+600 | Vuelta | 27,35 |
| 4 | 00+600 | Ida | 11,91 | 30 | 04+400 | Vuelta | 25,40 |
| 5 | 00+800 | Ida | 13,90 | 31 | 04+200 | Vuelta | 23,45 |
| 6 | 01+000 | Ida | 5,96 | 32 | 04+000 | Vuelta | 29,31 |
| 7 | 01+200 | Ida | 7,94 | 33 | 03+800 | Vuelta | 29,31 |
| 8 | 01+400 | Ida | 9,93 | 34 | 03+600 | Vuelta | 29,15 |
| 9 | 01+600 | Ida | 15,88 | 35 | 03+400 | Vuelta | 25,27 |
| 10 | 01+800 | Ida | 9,93 | 36 | 03+200 | Vuelta | 23,32 |
| 11 | 02+000 | Ida | 19,75 | 37 | 03+000 | Vuelta | 23,32 |
| 12 | 02+200 | Ida | 13,82 | 38 | 02+800 | Vuelta | 17,40 |
| 13 | 02+400 | Ida | 17,77 | 39 | 02+600 | Vuelta | 19,33 |
| 14 | 02+600 | Ida | 11,85 | 40 | 02+400 | Vuelta | 23,20 |
| 15 | 02+800 | Ida | 15,80 | 41 | 02+200 | Vuelta | 13,46 |
| 16 | 03+000 | Ida | 7,90 | 42 | 02+000 | Vuelta | 15,38 |
| 17 | 03+200 | Ida | 21,72 | 43 | 01+800 | Vuelta | 19,23 |
| 18 | 03+400 | Ida | 23,70 | 44 | 01+600 | Vuelta | 17,31 |
| 19 | 03+600 | Ida | 27,65 | 45 | 01+400 | Vuelta | 13,46 |
| 20 | 03+800 | Ida | 23,70 | 46 | 01+200 | Vuelta | 22,96 |
| 21 | 04+000 | Ida | 25,67 | 47 | 01+000 | Vuelta | 15,30 |
| 22 | 04+200 | Ida | 23,70 | 48 | 00+800 | Vuelta | 15,30 |
| 23 | 04+400 | Ida | 25,67 | 49 | 00+600 | Vuelta | 15,47 |
| 24 | 04+600 | Ida | 23,57 | 50 | 00+400 | Vuelta | 17,40 |
| 25 | 04+800 | Ida | 25,54 | 51 | 00+200 | Vuelta | 13,60 |
| 26 | 05+000 | Ida | 27,50 | 52 | 00+000 | Vuelta | 19,43 |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.3. Variación D_R (carril de ida).

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.3. se observa que los resultados de deflexión a 50 cm D_R del carril de ida, varían en algunas progresivas; desde la progresiva 00+000 a 03+000, los valores están entre 5,96 de 0,01mm a 19,75 de 0,01mm; sin embargo, desde la progresiva 03+200 a 05+000 los resultados son más altos porque están entre 21,72 de 0,01mm y 27,65 de 0,01mm, esto significa que existe un quiebre de resultados dividido en dos bandos que puede ser por varios motivos aún no detectados.

Gráfica 4.4. Variación D_R (carril de vuelta).

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.4. se observa que los resultados de deflexión a 50 cm D_R del carril de vuelta, varían en algunas progresivas; desde la progresiva 05+000 a 02+400, los valores están entre 17,40 de 0,01mm a 29,31 de 0,01mm; sin embargo, desde la progresiva 02+200 a 00+000 los resultados son más bajos porque están entre 13,46 de 0,01mm y 19,43 de 0,01mm, a excepción de la progresiva 01+200 que se dispara su valor a 22,96 de 0,01mm, esto significa que existe un quiebre de resultados dividido en dos bandos que puede ser por varios motivos aún no detectados.

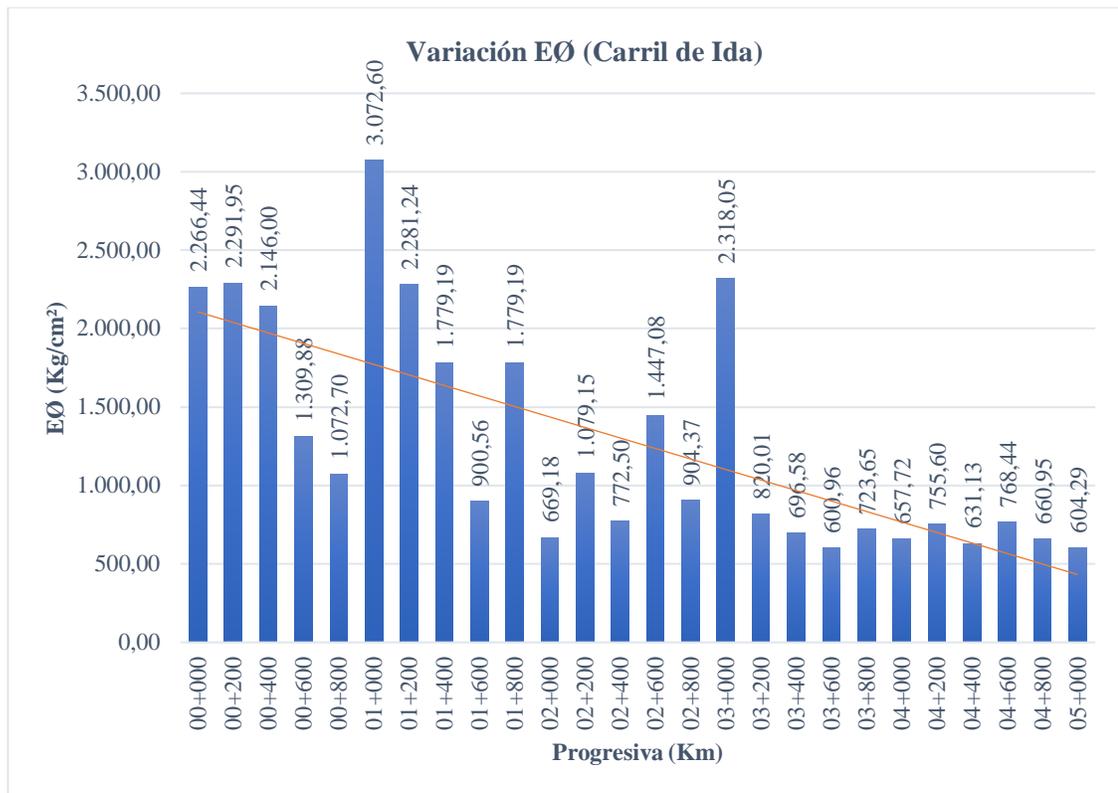
4.2.3. Análisis del módulo de elasticidad de la subrasante E_0

Los resultados obtenidos para ambos carriles son:

Tabla 4.5. Resultados del módulo de elasticidad de la subrasante E_0 de ambos carriles.

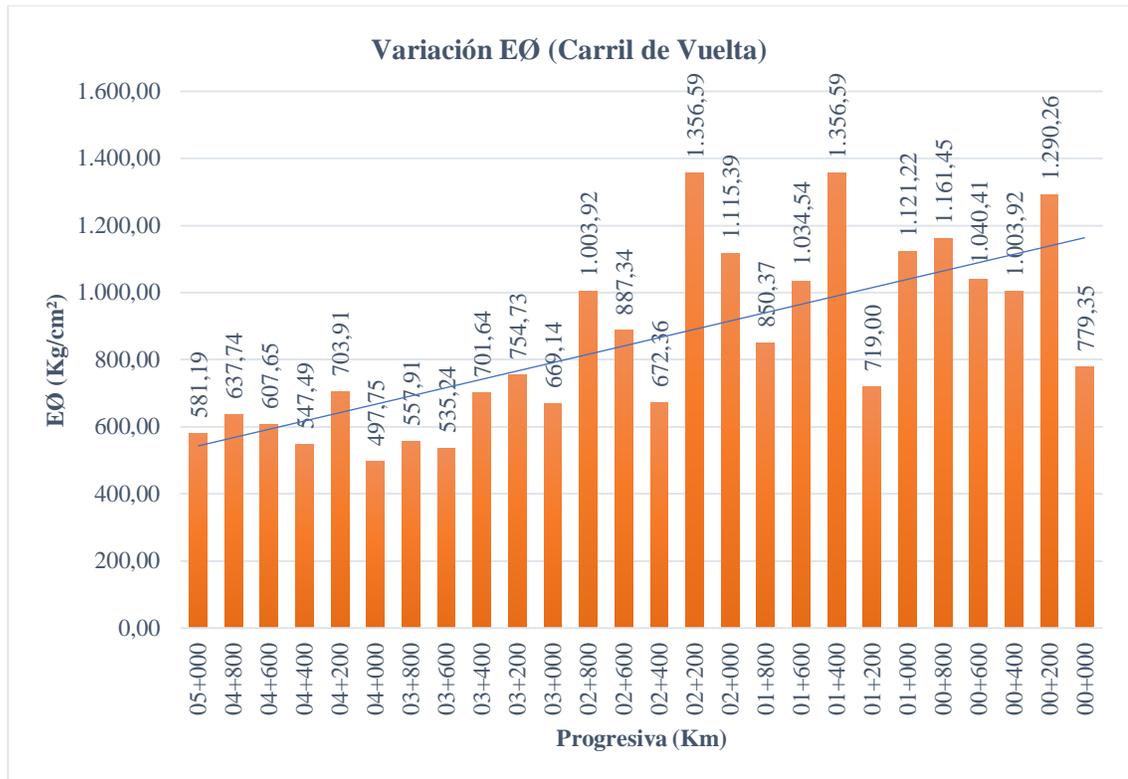
| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | E_0 (Kg/cm ²) | Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | E_0 (Kg/cm ²) |
|----------|-----------------|--------|-----------------------------|----------|-----------------|--------|-----------------------------|
| 1 | 00+000 | Ida | 2.266,44 | 27 | 05+000 | Vuelta | 581,19 |
| 2 | 00+200 | Ida | 2.291,95 | 28 | 04+800 | Vuelta | 637,74 |
| 3 | 00+400 | Ida | 2.146,00 | 29 | 04+600 | Vuelta | 607,65 |
| 4 | 00+600 | Ida | 1.309,88 | 30 | 04+400 | Vuelta | 547,49 |
| 5 | 00+800 | Ida | 1.072,70 | 31 | 04+200 | Vuelta | 703,91 |
| 6 | 01+000 | Ida | 3.072,60 | 32 | 04+000 | Vuelta | 497,75 |
| 7 | 01+200 | Ida | 2.281,24 | 33 | 03+800 | Vuelta | 557,91 |
| 8 | 01+400 | Ida | 1.779,19 | 34 | 03+600 | Vuelta | 535,24 |
| 9 | 01+600 | Ida | 900,56 | 35 | 03+400 | Vuelta | 701,64 |
| 10 | 01+800 | Ida | 1.779,19 | 36 | 03+200 | Vuelta | 754,73 |
| 11 | 02+000 | Ida | 669,18 | 37 | 03+000 | Vuelta | 669,14 |
| 12 | 02+200 | Ida | 1.079,15 | 38 | 02+800 | Vuelta | 1.003,92 |
| 13 | 02+400 | Ida | 772,50 | 39 | 02+600 | Vuelta | 887,34 |
| 14 | 02+600 | Ida | 1.447,08 | 40 | 02+400 | Vuelta | 672,36 |
| 15 | 02+800 | Ida | 904,37 | 41 | 02+200 | Vuelta | 1.356,59 |
| 16 | 03+000 | Ida | 2.318,05 | 42 | 02+000 | Vuelta | 1.115,39 |
| 17 | 03+200 | Ida | 820,01 | 43 | 01+800 | Vuelta | 850,37 |
| 18 | 03+400 | Ida | 696,58 | 44 | 01+600 | Vuelta | 1.034,54 |
| 19 | 03+600 | Ida | 600,96 | 45 | 01+400 | Vuelta | 1.356,59 |
| 20 | 03+800 | Ida | 723,65 | 46 | 01+200 | Vuelta | 719,00 |
| 21 | 04+000 | Ida | 657,72 | 47 | 01+000 | Vuelta | 1.121,22 |
| 22 | 04+200 | Ida | 755,60 | 48 | 00+800 | Vuelta | 1.161,45 |
| 23 | 04+400 | Ida | 631,13 | 49 | 00+600 | Vuelta | 1.040,41 |
| 24 | 04+600 | Ida | 768,44 | 50 | 00+400 | Vuelta | 1.003,92 |
| 25 | 04+800 | Ida | 660,95 | 51 | 00+200 | Vuelta | 1.290,26 |
| 26 | 05+000 | Ida | 604,29 | 52 | 00+000 | Vuelta | 779,35 |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.5. Variación del E_0 (carril de ida).

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.5. se observa que los resultados del módulo de elasticidad de la subrasante E_0 del carril de ida, varían en algunas progresivas; es decir que en la progresiva 01+000 se obtiene el mayor valor igual a 3.072,60 kg/cm² y en la progresiva 03+600, se obtiene el menor valor igual a 600,96 kg/cm². Sin embargo, a pesar de que existen progresivas con resultados elevados, existe una tendencia descendente.

Gráfica 4.6. Variación del E_{\emptyset} (carril de vuelta).

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.6. se observa que los resultados del módulo de elasticidad de la subrasante E_{\emptyset} del carril de vuelta, varían en algunas progresivas; es decir que en las progresivas 02+200 y 01+400 se obtienen el mayor valor igual a 1.356,59 kg/cm² y en la progresiva 04+000, se obtiene el menor valor igual a 497,75 kg/cm². Sin embargo, a pesar de que existen progresivas con resultados elevados, existe una tendencia ascendente.

4.2.4. Análisis del módulo de elasticidad equivalente del pavimento E*

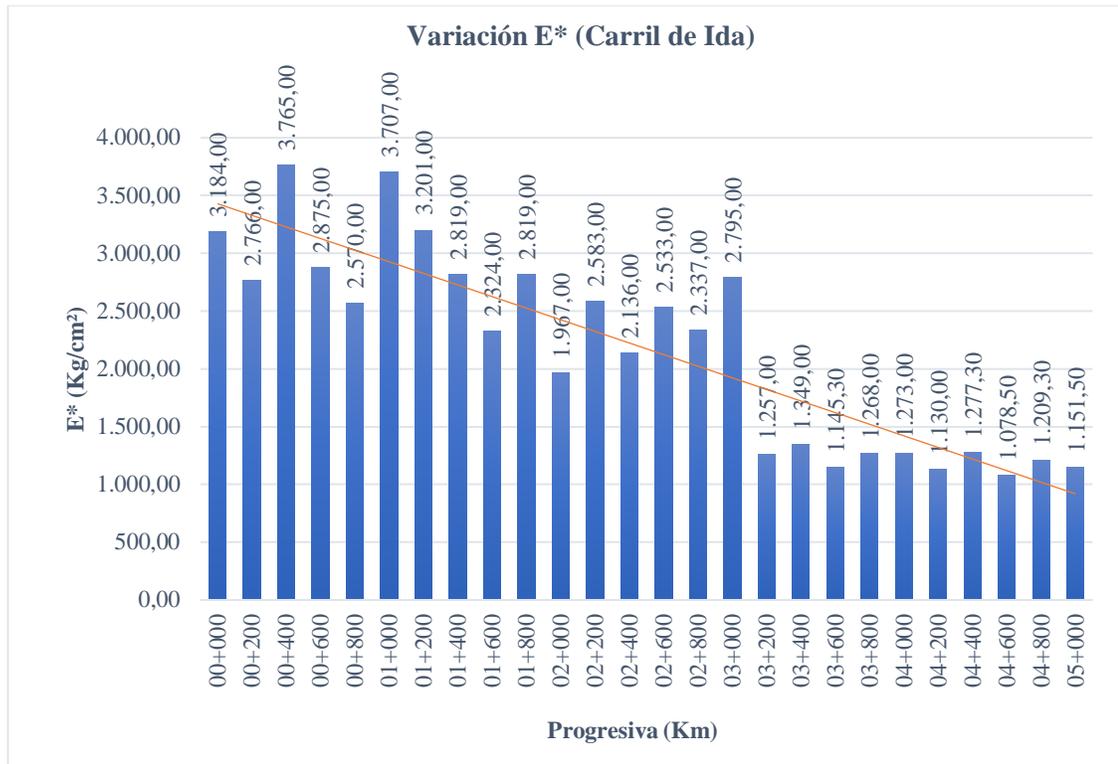
Los resultados obtenidos para ambos carriles son:

Tabla 4.6. Resultados del módulo de elasticidad de la subrasante E* de ambos carriles.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | E* (Kg/cm ²) | Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | E* (Kg/cm ²) |
|----------|-----------------|--------|--------------------------|----------|-----------------|--------|--------------------------|
| 1 | 00+000 | Ida | 3.184,00 | 27 | 05+000 | Vuelta | 1.226,50 |
| 2 | 00+200 | Ida | 2.766,00 | 28 | 04+800 | Vuelta | 1.291,00 |
| 3 | 00+400 | Ida | 3.765,00 | 29 | 04+600 | Vuelta | 1.157,60 |
| 4 | 00+600 | Ida | 2.875,00 | 30 | 04+400 | Vuelta | 1.481,50 |
| 5 | 00+800 | Ida | 2.570,00 | 31 | 04+200 | Vuelta | 1.363,50 |
| 6 | 01+000 | Ida | 3.707,00 | 32 | 04+000 | Vuelta | 1.240,40 |
| 7 | 01+200 | Ida | 3.201,00 | 33 | 03+800 | Vuelta | 1.105,30 |
| 8 | 01+400 | Ida | 2.819,00 | 34 | 03+600 | Vuelta | 1.174,30 |
| 9 | 01+600 | Ida | 2.324,00 | 35 | 03+400 | Vuelta | 1.096,00 |
| 10 | 01+800 | Ida | 2.819,00 | 36 | 03+200 | Vuelta | 1.213,00 |
| 11 | 02+000 | Ida | 1.967,00 | 37 | 03+000 | Vuelta | 1.467,50 |
| 12 | 02+200 | Ida | 2.583,00 | 38 | 02+800 | Vuelta | 1.657,50 |
| 13 | 02+400 | Ida | 2.136,00 | 39 | 02+600 | Vuelta | 1.552,20 |
| 14 | 02+600 | Ida | 2.533,00 | 40 | 02+400 | Vuelta | 1.475,50 |
| 15 | 02+800 | Ida | 2.337,00 | 41 | 02+200 | Vuelta | 1.773,00 |
| 16 | 03+000 | Ida | 2.795,00 | 42 | 02+000 | Vuelta | 1.950,00 |
| 17 | 03+200 | Ida | 1.257,00 | 43 | 01+800 | Vuelta | 1.684,50 |
| 18 | 03+400 | Ida | 1.349,00 | 44 | 01+600 | Vuelta | 1.547,00 |
| 19 | 03+600 | Ida | 1.145,30 | 45 | 01+400 | Vuelta | 1.773,00 |
| 20 | 03+800 | Ida | 1.268,00 | 46 | 01+200 | Vuelta | 1.392,50 |
| 21 | 04+000 | Ida | 1.273,00 | 47 | 01+000 | Vuelta | 1.960,50 |
| 22 | 04+200 | Ida | 1.130,00 | 48 | 00+800 | Vuelta | 1.798,00 |
| 23 | 04+400 | Ida | 1.277,30 | 49 | 00+600 | Vuelta | 2.137,00 |
| 24 | 04+600 | Ida | 1.078,50 | 50 | 00+400 | Vuelta | 1.657,40 |
| 25 | 04+800 | Ida | 1.209,30 | 51 | 00+200 | Vuelta | 2.097,00 |
| 26 | 05+000 | Ida | 1.151,50 | 52 | 00+000 | Vuelta | 1.813,00 |

Fuente: Elaboración propia.

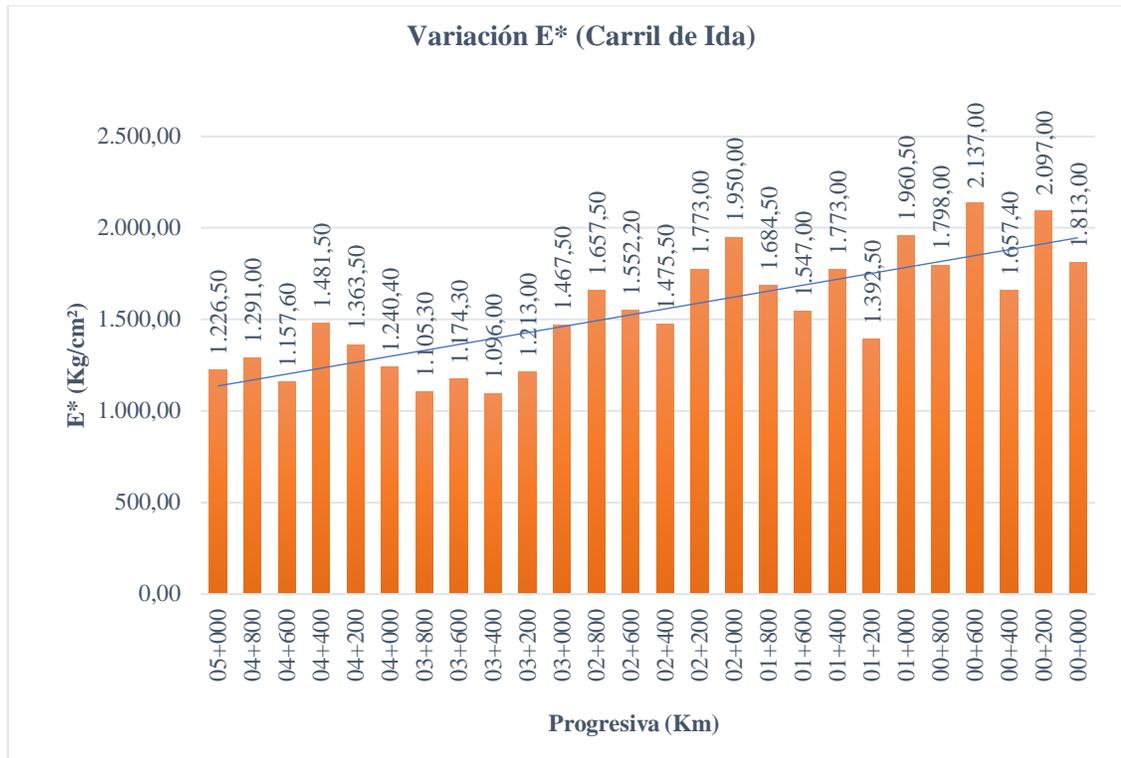
Gráfico 4.7. Variación del E* (carril de ida).



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.7. se observa que los resultados del módulo de elasticidad equivalente del pavimento E* del carril de ida, varían; por ejemplo, en la progresiva 00+400 se obtiene el mayor valor igual a 3.765,00 kg/cm² y en la progresiva 04+600, se obtiene el menor valor igual a 1.078,50 kg/cm². Sin embargo, a pesar de que existen progresivas con resultados elevados, existe una tendencia descendente.

Gráfica 4.8. Variación del E* (carril de vuelta).



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.8. se observa que los resultados del módulo de elasticidad equivalente del pavimento E* del carril de vuelta, varían; por ejemplo, en la progresiva 00+600 se obtiene el mayor valor igual a 2.137,00 kg/cm² y en la progresiva 03+400, se obtiene el menor valor igual a 1.096,00 kg/cm². Sin embargo, a pesar de que existen progresivas con resultados elevados, existe una tendencia ascendente.

4.2.5. Análisis de los resultados de CBR

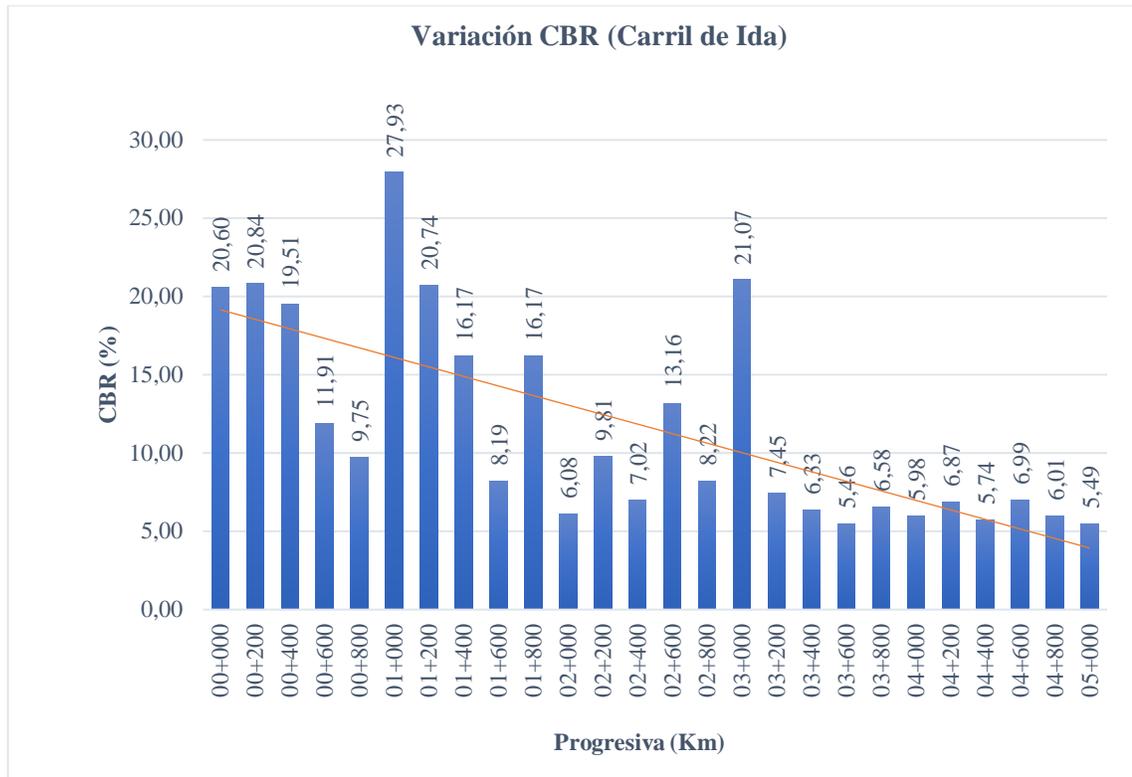
Los resultados obtenidos para ambos carriles son:

Tabla 4.7. Resultados del CBR de ambos carriles.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | CBR (%) | Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | CBR (%) |
|----------|-----------------|--------|---------|----------|-----------------|--------|---------|
| 1 | 00+000 | Ida | 20,60 | 27 | 05+000 | Vuelta | 5,28 |
| 2 | 00+200 | Ida | 20,84 | 28 | 04+800 | Vuelta | 5,80 |
| 3 | 00+400 | Ida | 19,51 | 29 | 04+600 | Vuelta | 5,52 |
| 4 | 00+600 | Ida | 11,91 | 30 | 04+400 | Vuelta | 4,98 |
| 5 | 00+800 | Ida | 9,75 | 31 | 04+200 | Vuelta | 6,40 |
| 6 | 01+000 | Ida | 27,93 | 32 | 04+000 | Vuelta | 4,53 |
| 7 | 01+200 | Ida | 20,74 | 33 | 03+800 | Vuelta | 5,07 |
| 8 | 01+400 | Ida | 16,17 | 34 | 03+600 | Vuelta | 4,87 |
| 9 | 01+600 | Ida | 8,19 | 35 | 03+400 | Vuelta | 6,38 |
| 10 | 01+800 | Ida | 16,17 | 36 | 03+200 | Vuelta | 6,86 |
| 11 | 02+000 | Ida | 6,08 | 37 | 03+000 | Vuelta | 6,08 |
| 12 | 02+200 | Ida | 9,81 | 38 | 02+800 | Vuelta | 9,13 |
| 13 | 02+400 | Ida | 7,02 | 39 | 02+600 | Vuelta | 8,07 |
| 14 | 02+600 | Ida | 13,16 | 40 | 02+400 | Vuelta | 6,11 |
| 15 | 02+800 | Ida | 8,22 | 41 | 02+200 | Vuelta | 12,33 |
| 16 | 03+000 | Ida | 21,07 | 42 | 02+000 | Vuelta | 10,14 |
| 17 | 03+200 | Ida | 7,45 | 43 | 01+800 | Vuelta | 7,73 |
| 18 | 03+400 | Ida | 6,33 | 44 | 01+600 | Vuelta | 9,40 |
| 19 | 03+600 | Ida | 5,46 | 45 | 01+400 | Vuelta | 12,33 |
| 20 | 03+800 | Ida | 6,58 | 46 | 01+200 | Vuelta | 6,54 |
| 21 | 04+000 | Ida | 5,98 | 47 | 01+000 | Vuelta | 10,19 |
| 22 | 04+200 | Ida | 6,87 | 48 | 00+800 | Vuelta | 10,56 |
| 23 | 04+400 | Ida | 5,74 | 49 | 00+600 | Vuelta | 9,46 |
| 24 | 04+600 | Ida | 6,99 | 50 | 00+400 | Vuelta | 9,13 |
| 25 | 04+800 | Ida | 6,01 | 51 | 00+200 | Vuelta | 11,73 |
| 26 | 05+000 | Ida | 5,49 | 52 | 00+000 | Vuelta | 7,09 |

Fuente: Elaboración propia.

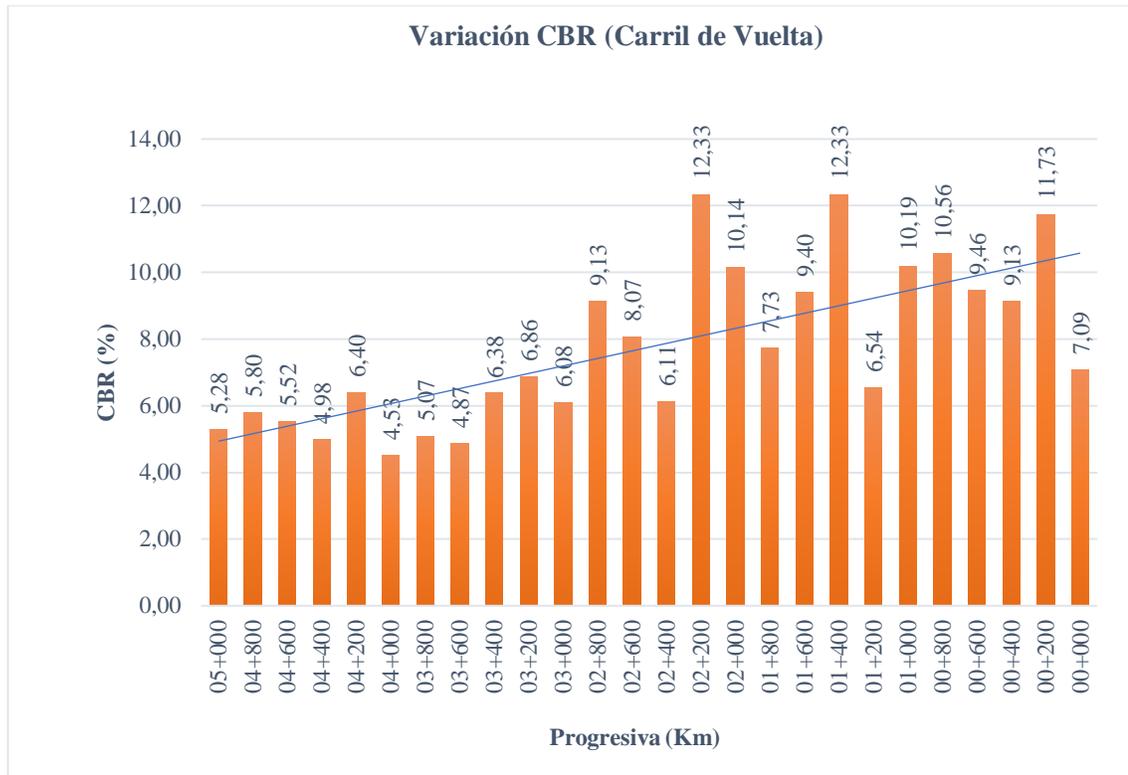
Gráfico 4.9. Variación del CBR (carril de ida).



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.9. se observa que los resultados de CBR del carril de ida, varían de forma descendente; sin embargo, existen valores que se disparan en algunas progresivas, por ejemplo, en la progresiva 01+000 se obtiene el mayor valor igual a 27,93% y en la progresiva 03+600, se obtiene el menor valor igual a 5,46%.

Gráfica 4.10. Variación del CBR (carril de vuelta).



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.10. se observa que los resultados de CBR del carril de vuelta, varían de forma ascendente; sin embargo, existen valores que se disparan en algunas progresivas, por ejemplo, en las progresivas 02+200 y 01+400 se obtienen el mayor valor igual a 12,33% y en la progresiva 04+000, se obtiene el menor valor igual a 4,53%.

4.2.6. Análisis de los resultados del refuerzo del pavimento DH

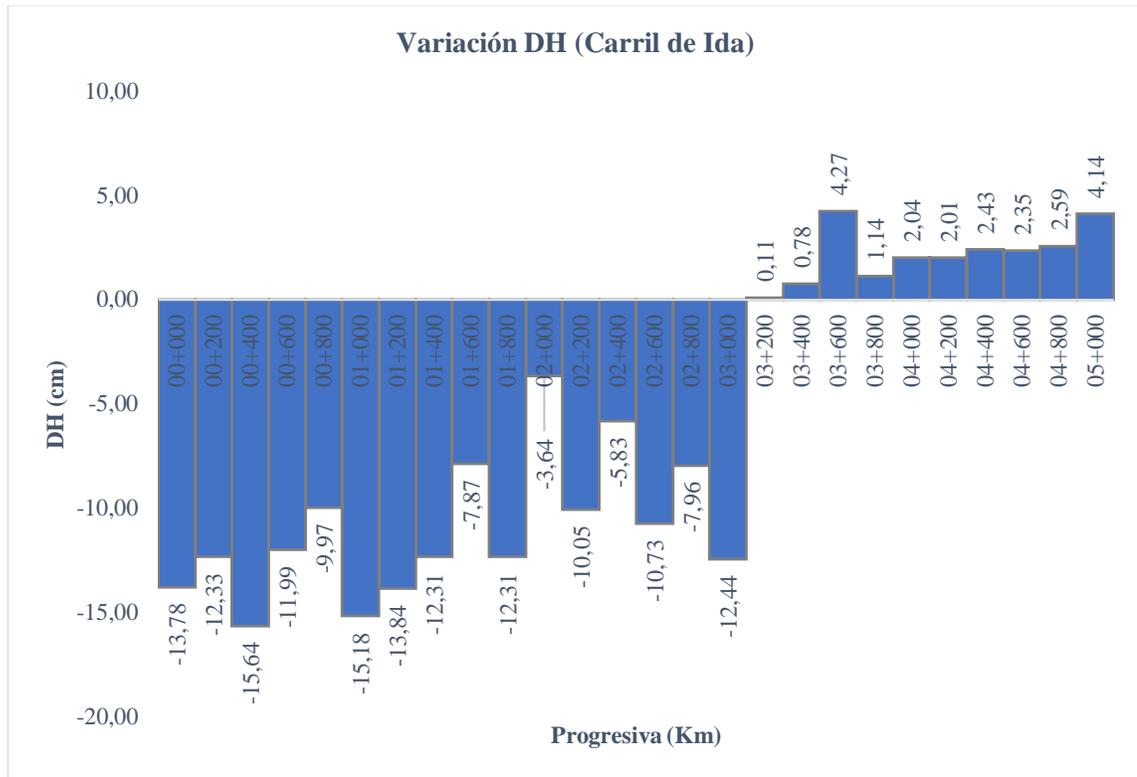
Los resultados obtenidos para ambos carriles son:

Tabla 4.8. Resultados del refuerzo del pavimento DH de ambos carriles.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | DH (cm) | Punto N° | Progresiva (Km) | Carril | DH (cm) |
|----------|-----------------|--------|---------|----------|-----------------|--------|---------|
| 1 | 00+000 | Ida | -13,78 | 27 | 05+000 | Vuelta | 3,84 |
| 2 | 00+200 | Ida | -12,33 | 28 | 04+800 | Vuelta | 2,19 |
| 3 | 00+400 | Ida | -15,64 | 29 | 04+600 | Vuelta | 4,01 |
| 4 | 00+600 | Ida | -11,99 | 30 | 04+400 | Vuelta | 2,13 |
| 5 | 00+800 | Ida | -9,97 | 31 | 04+200 | Vuelta | 0,56 |
| 6 | 01+000 | Ida | -15,18 | 32 | 04+000 | Vuelta | 5,62 |
| 7 | 01+200 | Ida | -13,84 | 33 | 03+800 | Vuelta | 5,58 |
| 8 | 01+400 | Ida | -12,31 | 34 | 03+600 | Vuelta | 5,37 |
| 9 | 01+600 | Ida | -7,87 | 35 | 03+400 | Vuelta | 3,08 |
| 10 | 01+800 | Ida | -12,31 | 36 | 03+200 | Vuelta | 1,24 |
| 11 | 02+000 | Ida | -3,64 | 37 | 03+000 | Vuelta | 0,15 |
| 12 | 02+200 | Ida | -10,05 | 38 | 02+800 | Vuelta | -4,41 |
| 13 | 02+400 | Ida | -5,83 | 39 | 02+600 | Vuelta | -2,86 |
| 14 | 02+600 | Ida | -10,73 | 40 | 02+400 | Vuelta | 0,04 |
| 15 | 02+800 | Ida | -7,96 | 41 | 02+200 | Vuelta | -6,64 |
| 16 | 03+000 | Ida | -12,44 | 42 | 02+000 | Vuelta | -6,81 |
| 17 | 03+200 | Ida | 0,11 | 43 | 01+800 | Vuelta | -3,51 |
| 18 | 03+400 | Ida | 0,78 | 44 | 01+600 | Vuelta | -3,83 |
| 19 | 03+600 | Ida | 4,27 | 45 | 01+400 | Vuelta | -6,64 |
| 20 | 03+800 | Ida | 1,14 | 46 | 01+200 | Vuelta | 0,11 |
| 21 | 04+000 | Ida | 2,04 | 47 | 01+000 | Vuelta | -6,90 |
| 22 | 04+200 | Ida | 2,01 | 48 | 00+800 | Vuelta | -6,10 |
| 23 | 04+400 | Ida | 2,43 | 49 | 00+600 | Vuelta | -7,55 |
| 24 | 04+600 | Ida | 2,35 | 50 | 00+400 | Vuelta | -4,41 |
| 25 | 04+800 | Ida | 2,59 | 51 | 00+200 | Vuelta | -8,25 |
| 26 | 05+000 | Ida | 4,14 | 52 | 00+000 | Vuelta | -3,77 |

Fuente: Elaboración propia.

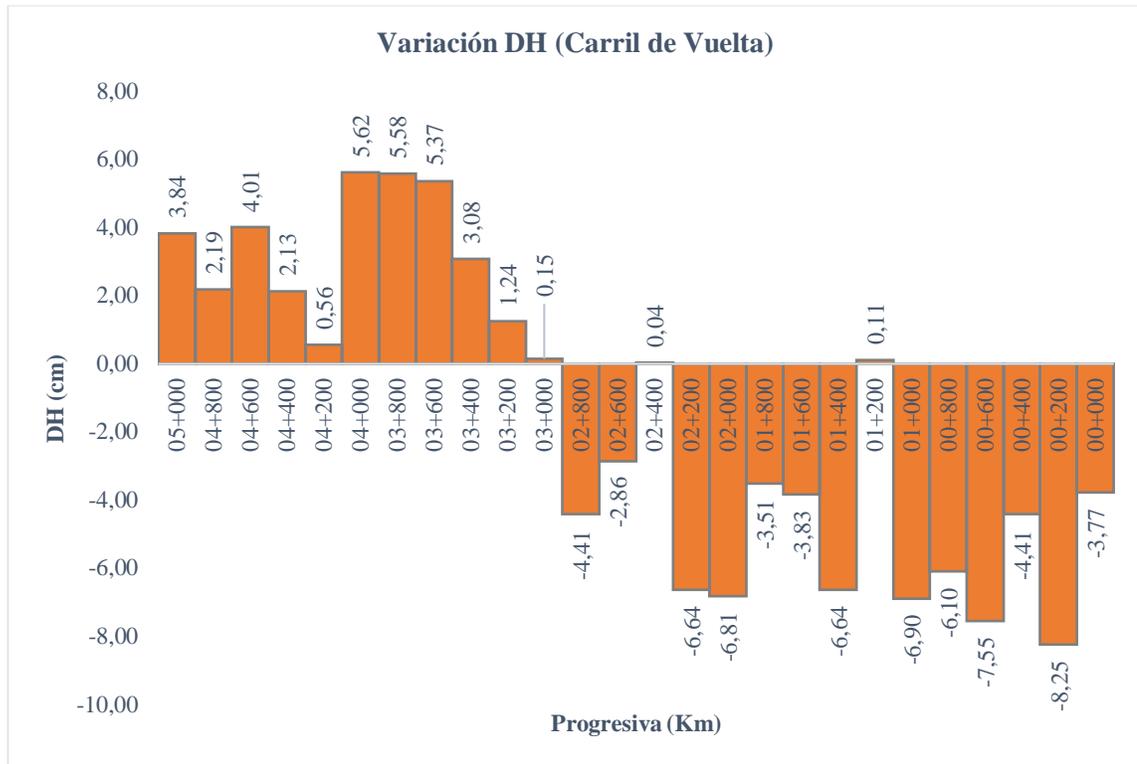
Gráfico 4.11. Variación del refuerzo del pavimento DH (carril de ida).



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.11. se observa que los resultados del refuerzo del pavimento DH del carril de ida, varían de forma; sin embargo se denota claramente que existen dos partes del tramo de ida, la primera parte con resultados negativos que según el modelo matemático de Hogg, no necesita refuerzo de carpeta asfáltica desde la progresiva 00+000 a la progresiva 03+000; y existe la segunda parte con valores positivos que sí requieren de refuerzo de carpeta asfáltica como ser desde la progresiva 03+200 a la progresiva 05+000, en esta segunda parte los valores oscilan entre 0 a 4,30 cm de espesor que requiere el refuerzo de carpeta asfáltica.

Gráfica 4.12. Variación del refuerzo del pavimento DH (carril de vuelta).



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.12. se observa que los resultados del refuerzo del pavimento DH del carril de vuelta, varían de forma; sin embargo se denota claramente que existen dos partes del tramo de vuelta, la primera parte con resultados positivos que según el modelo matemático de Hogg, necesita refuerzo de carpeta asfáltica desde la progresiva 05+000 a la progresiva 03+000; y existe la segunda parte con valores negativos que no requieren de refuerzo de carpeta asfáltica como ser desde la progresiva 02+800 a la progresiva 00+000, a excepción de dos progresivas 02+400 y 01+200 que dan resultados positivos pero con valores muy bajos próximos a cero. En la primera parte los valores oscilan entre 0 a 5,65 cm de espesor que requiere el refuerzo de carpeta asfáltica.

4.3. ANÁLISIS DE RELACIÓN ENTRE RESULTADOS OBTENIDOS

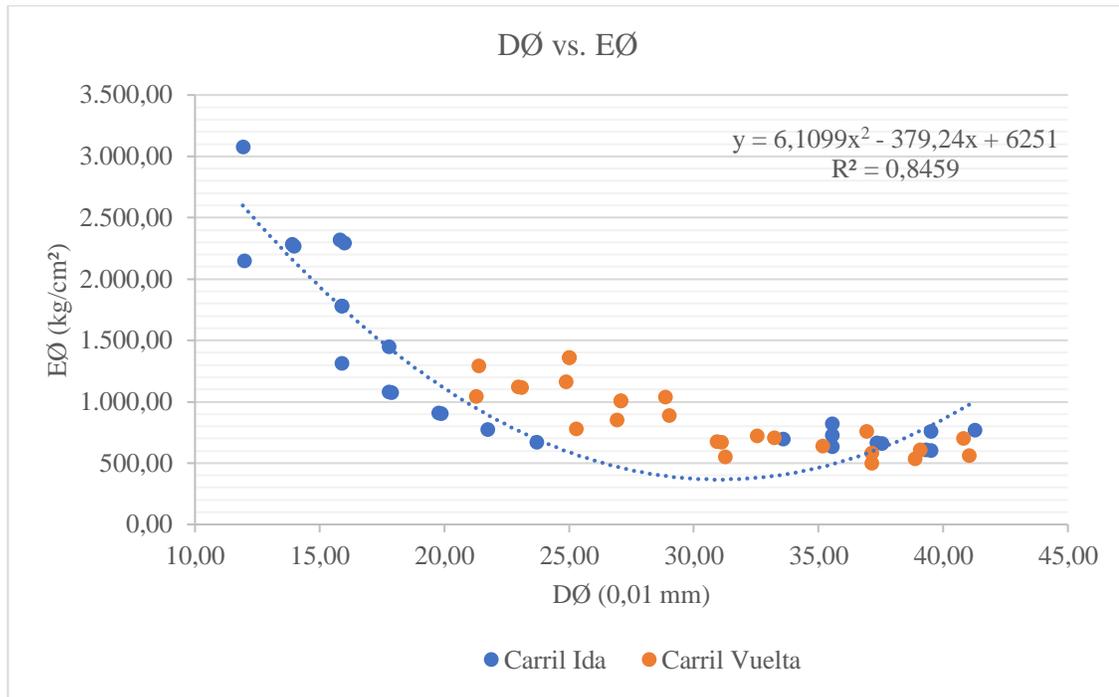
4.3.1. Influencia de D_0 en el E_0

Los resultados obtenidos para ambos carriles son:

Tabla 4.9. Resultados D_0 y E_0 de ambos carriles.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril de ida | | Punto N° | Progresiva (Km) | Carril de vuelta | |
|-------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| | | $D_0 = D_0$ (0,01mm) | E_0 (Kg/cm ²) | | | $D_0 = D_0$ (0,01mm) | E_0 (Kg/cm ²) |
| 1 | 00+000 | 13,97 | 2.266,44 | 27 | 05+000 | 37,12 | 581,19 |
| 2 | 00+200 | 15,97 | 2.291,95 | 28 | 04+800 | 35,17 | 637,74 |
| 3 | 00+400 | 11,98 | 2.146,00 | 29 | 04+600 | 39,08 | 607,65 |
| 4 | 00+600 | 15,88 | 1.309,88 | 30 | 04+400 | 31,26 | 547,49 |
| 5 | 00+800 | 17,87 | 1.072,70 | 31 | 04+200 | 33,21 | 703,91 |
| 6 | 01+000 | 11,91 | 3.072,60 | 32 | 04+000 | 37,12 | 497,75 |
| 7 | 01+200 | 13,90 | 2.281,24 | 33 | 03+800 | 41,03 | 557,91 |
| 8 | 01+400 | 15,88 | 1.779,19 | 34 | 03+600 | 38,87 | 535,24 |
| 9 | 01+600 | 19,86 | 900,56 | 35 | 03+400 | 40,81 | 701,64 |
| 10 | 01+800 | 15,88 | 1.779,19 | 36 | 03+200 | 36,93 | 754,73 |
| 11 | 02+000 | 23,70 | 669,18 | 37 | 03+000 | 31,10 | 669,14 |
| 12 | 02+200 | 17,77 | 1.079,15 | 38 | 02+800 | 27,07 | 1.003,92 |
| 13 | 02+400 | 21,72 | 772,50 | 39 | 02+600 | 29,00 | 887,34 |
| 14 | 02+600 | 17,77 | 1.447,08 | 40 | 02+400 | 30,93 | 672,36 |
| 15 | 02+800 | 19,75 | 904,37 | 41 | 02+200 | 25,00 | 1.356,59 |
| 16 | 03+000 | 15,80 | 2.318,05 | 42 | 02+000 | 23,08 | 1.115,39 |
| 17 | 03+200 | 35,55 | 820,01 | 43 | 01+800 | 26,92 | 850,37 |
| 18 | 03+400 | 33,57 | 696,58 | 44 | 01+600 | 28,85 | 1.034,54 |
| 19 | 03+600 | 39,50 | 600,96 | 45 | 01+400 | 25,00 | 1.356,59 |
| 20 | 03+800 | 35,55 | 723,65 | 46 | 01+200 | 32,52 | 719,00 |
| 21 | 04+000 | 37,52 | 657,72 | 47 | 01+000 | 22,96 | 1.121,22 |
| 22 | 04+200 | 39,50 | 755,60 | 48 | 00+800 | 24,87 | 1.161,45 |
| 23 | 04+400 | 35,55 | 631,13 | 49 | 00+600 | 21,27 | 1.040,41 |
| 24 | 04+600 | 41,25 | 768,44 | 50 | 00+400 | 27,07 | 1.003,92 |
| 25 | 04+800 | 37,32 | 660,95 | 51 | 00+200 | 21,38 | 1.290,26 |
| 26 | 05+000 | 39,29 | 604,29 | 52 | 00+000 | 25,27 | 779,35 |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.13. Relación D_{\emptyset} vs. E_{\emptyset} 

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.13. se observa que existe una relación casi directa entre D_{\emptyset} y E_{\emptyset} , porque a medida que aumenta la deflexión máxima, reduce de los valores del módulo de elasticidad de la subrasante, es decir que el pavimento al deformarse más, genera un mayor esfuerzo en la subrasante y por ende tiene menos recuperabilidad elástica, lo cual puede suscitar a fallas continuas en la subrasante, provocando daños irreparables al pavimento.

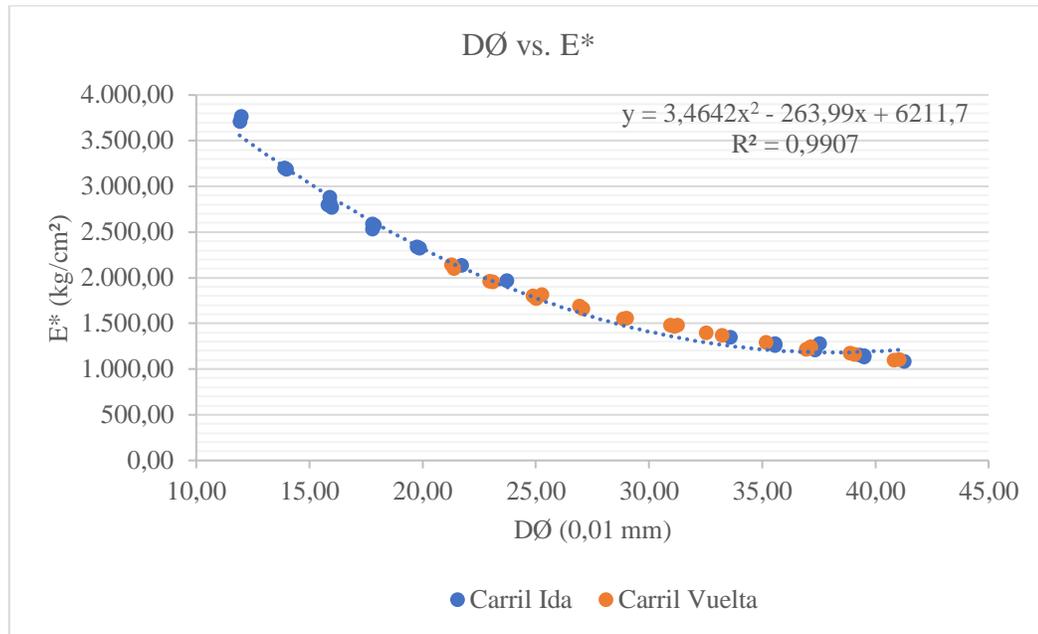
4.3.2. Influencia de D_0 en el E^*

Los resultados obtenidos para ambos carriles son:

Tabla 4.10. Resultados D_0 y E^* de ambos carriles.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril de ida | | Punto N° | Progresiva (Km) | Carril de vuelta | |
|-------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| | | $D_0 = D_0$ (0,01mm) | E^* (Kg/cm ²) | | | $D_0 = D_0$ (0,01mm) | E^* (Kg/cm ²) |
| 1 | 00+000 | 13,97 | 3.184,00 | 27 | 05+000 | 37,12 | 1.226,50 |
| 2 | 00+200 | 15,97 | 2.766,00 | 28 | 04+800 | 35,17 | 1.291,00 |
| 3 | 00+400 | 11,98 | 3.765,00 | 29 | 04+600 | 39,08 | 1.157,60 |
| 4 | 00+600 | 15,88 | 2.875,00 | 30 | 04+400 | 31,26 | 1.481,50 |
| 5 | 00+800 | 17,87 | 2.570,00 | 31 | 04+200 | 33,21 | 1.363,50 |
| 6 | 01+000 | 11,91 | 3.707,00 | 32 | 04+000 | 37,12 | 1.240,40 |
| 7 | 01+200 | 13,90 | 3.201,00 | 33 | 03+800 | 41,03 | 1.105,30 |
| 8 | 01+400 | 15,88 | 2.819,00 | 34 | 03+600 | 38,87 | 1.174,30 |
| 9 | 01+600 | 19,86 | 2.324,00 | 35 | 03+400 | 40,81 | 1.096,00 |
| 10 | 01+800 | 15,88 | 2.819,00 | 36 | 03+200 | 36,93 | 1.213,00 |
| 11 | 02+000 | 23,70 | 1.967,00 | 37 | 03+000 | 31,10 | 1.467,50 |
| 12 | 02+200 | 17,77 | 2.583,00 | 38 | 02+800 | 27,07 | 1.657,50 |
| 13 | 02+400 | 21,72 | 2.136,00 | 39 | 02+600 | 29,00 | 1.552,20 |
| 14 | 02+600 | 17,77 | 2.533,00 | 40 | 02+400 | 30,93 | 1.475,50 |
| 15 | 02+800 | 19,75 | 2.337,00 | 41 | 02+200 | 25,00 | 1.773,00 |
| 16 | 03+000 | 15,80 | 2.795,00 | 42 | 02+000 | 23,08 | 1.950,00 |
| 17 | 03+200 | 35,55 | 1.257,00 | 43 | 01+800 | 26,92 | 1.684,50 |
| 18 | 03+400 | 33,57 | 1.349,00 | 44 | 01+600 | 28,85 | 1.547,00 |
| 19 | 03+600 | 39,50 | 1.145,30 | 45 | 01+400 | 25,00 | 1.773,00 |
| 20 | 03+800 | 35,55 | 1.268,00 | 46 | 01+200 | 32,52 | 1.392,50 |
| 21 | 04+000 | 37,52 | 1.273,00 | 47 | 01+000 | 22,96 | 1.960,50 |
| 22 | 04+200 | 39,50 | 1.130,00 | 48 | 00+800 | 24,87 | 1.798,00 |
| 23 | 04+400 | 35,55 | 1.277,30 | 49 | 00+600 | 21,27 | 2.137,00 |
| 24 | 04+600 | 41,25 | 1.078,50 | 50 | 00+400 | 27,07 | 1.657,40 |
| 25 | 04+800 | 37,32 | 1.209,30 | 51 | 00+200 | 21,38 | 2.097,00 |
| 26 | 05+000 | 39,29 | 1.151,50 | 52 | 00+000 | 25,27 | 1.813,00 |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.14. Relación D_{\emptyset} vs. E^* 

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.14. se observa que existe una relación directa entre D_{\emptyset} y E^* , porque a medida que aumenta la deflexión máxima, reduce de los valores del módulo de elasticidad equivalente del pavimento, es decir que el pavimento al deformarse más, tiene menos recuperabilidad elástica. Y al observar este gráfico se deduce que los valores que proporciona la viga Benkelman sí generan resultados de una evaluación estructural del pavimento porque proporciona el módulo de elasticidad equivalente del mismo.

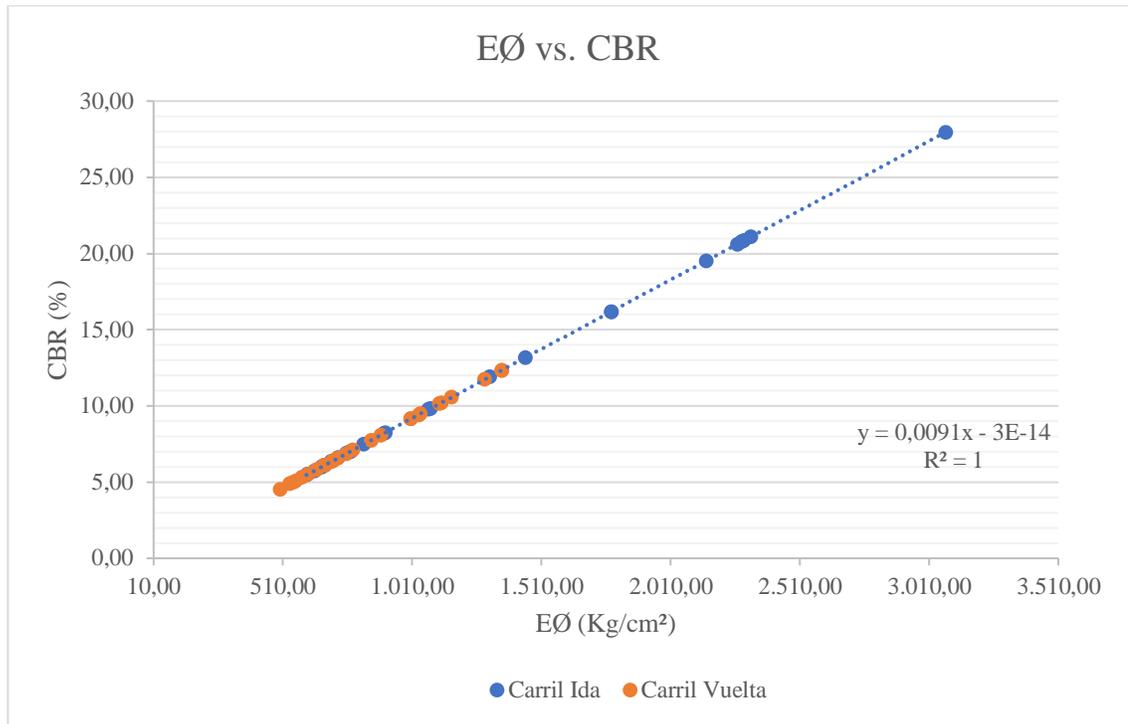
4.3.3. Influencia de E_0 en el CBR

Los resultados obtenidos para ambos carriles son:

Tabla 4.11. Resultados E_0 y CBR de ambos carriles.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril de ida | | Punto N° | Progresiva (Km) | Carril de vuelta | |
|-------------|--------------------|--------------------------------|------------|-------------|--------------------|--------------------------------|------------|
| | | E_0 (Kg/cm ²) | CBR (%) | | | E_0 (Kg/cm ²) | CBR (%) |
| 1 | 00+000 | 2.266,44 | 20,60 | 27 | 05+000 | 581,19 | 5,28 |
| 2 | 00+200 | 2.291,95 | 20,84 | 28 | 04+800 | 637,74 | 5,80 |
| 3 | 00+400 | 2.146,00 | 19,51 | 29 | 04+600 | 607,65 | 5,52 |
| 4 | 00+600 | 1.309,88 | 11,91 | 30 | 04+400 | 547,49 | 4,98 |
| 5 | 00+800 | 1.072,70 | 9,75 | 31 | 04+200 | 703,91 | 6,40 |
| 6 | 01+000 | 3.072,60 | 27,93 | 32 | 04+000 | 497,75 | 4,53 |
| 7 | 01+200 | 2.281,24 | 20,74 | 33 | 03+800 | 557,91 | 5,07 |
| 8 | 01+400 | 1.779,19 | 16,17 | 34 | 03+600 | 535,24 | 4,87 |
| 9 | 01+600 | 900,56 | 8,19 | 35 | 03+400 | 701,64 | 6,38 |
| 10 | 01+800 | 1.779,19 | 16,17 | 36 | 03+200 | 754,73 | 6,86 |
| 11 | 02+000 | 669,18 | 6,08 | 37 | 03+000 | 669,14 | 6,08 |
| 12 | 02+200 | 1.079,15 | 9,81 | 38 | 02+800 | 1.003,92 | 9,13 |
| 13 | 02+400 | 772,50 | 7,02 | 39 | 02+600 | 887,34 | 8,07 |
| 14 | 02+600 | 1.447,08 | 13,16 | 40 | 02+400 | 672,36 | 6,11 |
| 15 | 02+800 | 904,37 | 8,22 | 41 | 02+200 | 1.356,59 | 12,33 |
| 16 | 03+000 | 2.318,05 | 21,07 | 42 | 02+000 | 1.115,39 | 10,14 |
| 17 | 03+200 | 820,01 | 7,45 | 43 | 01+800 | 850,37 | 7,73 |
| 18 | 03+400 | 696,58 | 6,33 | 44 | 01+600 | 1.034,54 | 9,40 |
| 19 | 03+600 | 600,96 | 5,46 | 45 | 01+400 | 1.356,59 | 12,33 |
| 20 | 03+800 | 723,65 | 6,58 | 46 | 01+200 | 719,00 | 6,54 |
| 21 | 04+000 | 657,72 | 5,98 | 47 | 01+000 | 1.121,22 | 10,19 |
| 22 | 04+200 | 755,60 | 6,87 | 48 | 00+800 | 1.161,45 | 10,56 |
| 23 | 04+400 | 631,13 | 5,74 | 49 | 00+600 | 1.040,41 | 9,46 |
| 24 | 04+600 | 768,44 | 6,99 | 50 | 00+400 | 1.003,92 | 9,13 |
| 25 | 04+800 | 660,95 | 6,01 | 51 | 00+200 | 1.290,26 | 11,73 |
| 26 | 05+000 | 604,29 | 5,49 | 52 | 00+000 | 779,35 | 7,09 |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.15. Relación E_0 vs. CBR

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.15. se observa que existe una relación exacta entre E_0 y CBR, porque a medida que aumenta el módulo de elasticidad de la subrasante, también aumenta el CBR, esto se debe porque mientras mejor sea la resistencia del suelo, mayor será su módulo de recuperabilidad elástica y por tanto tendrá mayor % de CBR. Con esta gráfica se demuestra que el modelo matemático de Hogg, aplica claramente los conceptos básicos de los parámetros resistentes de los suelos.

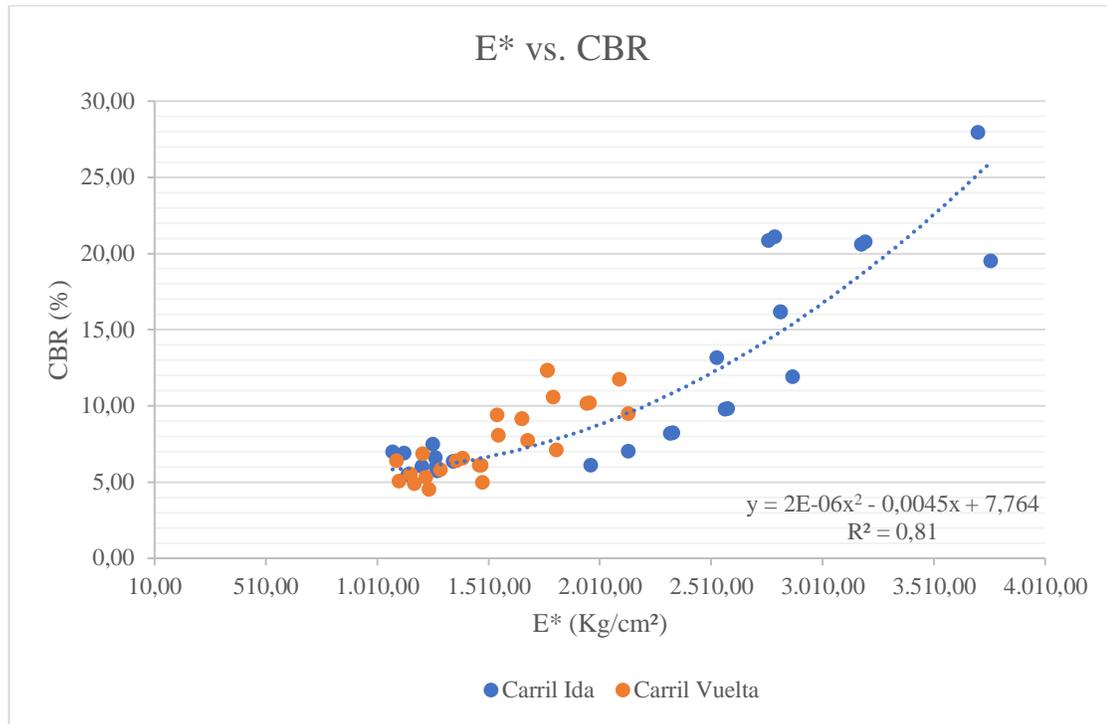
4.3.4. Influencia de E* en el CBR

Los resultados obtenidos para ambos carriles son:

Tabla 4.12. Resultados E* y CBR de ambos carriles.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril de ida | | Punto N° | Progresiva (Km) | Carril de vuelta | |
|-------------|--------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------------|-----------------------------|------------|
| | | E* (Kg/cm ²) | CBR (%) | | | E* (Kg/cm ²) | CBR (%) |
| 1 | 00+000 | 3.184,00 | 20,60 | 27 | 05+000 | 1.226,50 | 5,28 |
| 2 | 00+200 | 2.766,00 | 20,84 | 28 | 04+800 | 1.291,00 | 5,80 |
| 3 | 00+400 | 3.765,00 | 19,51 | 29 | 04+600 | 1.157,60 | 5,52 |
| 4 | 00+600 | 2.875,00 | 11,91 | 30 | 04+400 | 1.481,50 | 4,98 |
| 5 | 00+800 | 2.570,00 | 9,75 | 31 | 04+200 | 1.363,50 | 6,40 |
| 6 | 01+000 | 3.707,00 | 27,93 | 32 | 04+000 | 1.240,40 | 4,53 |
| 7 | 01+200 | 3.201,00 | 20,74 | 33 | 03+800 | 1.105,30 | 5,07 |
| 8 | 01+400 | 2.819,00 | 16,17 | 34 | 03+600 | 1.174,30 | 4,87 |
| 9 | 01+600 | 2.324,00 | 8,19 | 35 | 03+400 | 1.096,00 | 6,38 |
| 10 | 01+800 | 2.819,00 | 16,17 | 36 | 03+200 | 1.213,00 | 6,86 |
| 11 | 02+000 | 1.967,00 | 6,08 | 37 | 03+000 | 1.467,50 | 6,08 |
| 12 | 02+200 | 2.583,00 | 9,81 | 38 | 02+800 | 1.657,50 | 9,13 |
| 13 | 02+400 | 2.136,00 | 7,02 | 39 | 02+600 | 1.552,20 | 8,07 |
| 14 | 02+600 | 2.533,00 | 13,16 | 40 | 02+400 | 1.475,50 | 6,11 |
| 15 | 02+800 | 2.337,00 | 8,22 | 41 | 02+200 | 1.773,00 | 12,33 |
| 16 | 03+000 | 2.795,00 | 21,07 | 42 | 02+000 | 1.950,00 | 10,14 |
| 17 | 03+200 | 1.257,00 | 7,45 | 43 | 01+800 | 1.684,50 | 7,73 |
| 18 | 03+400 | 1.349,00 | 6,33 | 44 | 01+600 | 1.547,00 | 9,40 |
| 19 | 03+600 | 1.145,30 | 5,46 | 45 | 01+400 | 1.773,00 | 12,33 |
| 20 | 03+800 | 1.268,00 | 6,58 | 46 | 01+200 | 1.392,50 | 6,54 |
| 21 | 04+000 | 1.273,00 | 5,98 | 47 | 01+000 | 1.960,50 | 10,19 |
| 22 | 04+200 | 1.130,00 | 6,87 | 48 | 00+800 | 1.798,00 | 10,56 |
| 23 | 04+400 | 1.277,30 | 5,74 | 49 | 00+600 | 2.137,00 | 9,46 |
| 24 | 04+600 | 1.078,50 | 6,99 | 50 | 00+400 | 1.657,40 | 9,13 |
| 25 | 04+800 | 1.209,30 | 6,01 | 51 | 00+200 | 2.097,00 | 11,73 |
| 26 | 05+000 | 1.151,50 | 5,49 | 52 | 00+000 | 1.813,00 | 7,09 |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.16. Relación E \emptyset vs. CBR

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.16. se observa que existe una relación directa entre E* y CBR, porque a medida que aumenta el módulo de elasticidad equivalente del pavimento, también aumenta el CBR, esto se debe a que el modelo matemático de Hogg, toma el valor del CBR de la subrasante para poder determinar un módulo aproximado que según el espesor del pavimento permite proporcionar su influencia en la determinación del espesor del refuerzo requerido.

4.3.5. Influencia de E* en el DH

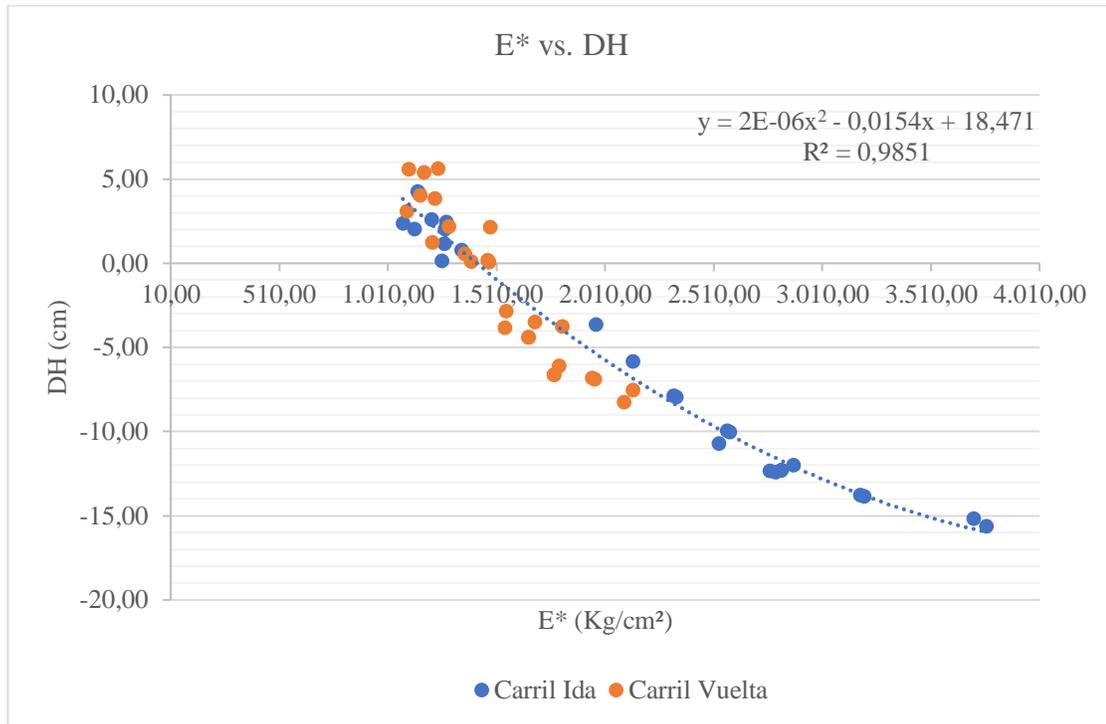
Los resultados obtenidos para ambos carriles son:

Tabla 4.13. Resultados E* y DH de ambos carriles.

| Punto N° | Progresiva (Km) | Carril de ida | | Punto N° | Progresiva (Km) | Carril de vuelta | |
|-------------|--------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------------|-----------------------------|------------|
| | | E* (Kg/cm ²) | DH (cm) | | | E* (Kg/cm ²) | DH (cm) |
| 1 | 00+000 | 3.184,00 | -13,78 | 27 | 05+000 | 1.226,50 | 3,84 |
| 2 | 00+200 | 2.766,00 | -12,33 | 28 | 04+800 | 1.291,00 | 2,19 |
| 3 | 00+400 | 3.765,00 | -15,64 | 29 | 04+600 | 1.157,60 | 4,01 |
| 4 | 00+600 | 2.875,00 | -11,99 | 30 | 04+400 | 1.481,50 | 2,13 |
| 5 | 00+800 | 2.570,00 | -9,97 | 31 | 04+200 | 1.363,50 | 0,56 |
| 6 | 01+000 | 3.707,00 | -15,18 | 32 | 04+000 | 1.240,40 | 5,62 |
| 7 | 01+200 | 3.201,00 | -13,84 | 33 | 03+800 | 1.105,30 | 5,58 |
| 8 | 01+400 | 2.819,00 | -12,31 | 34 | 03+600 | 1.174,30 | 5,37 |
| 9 | 01+600 | 2.324,00 | -7,87 | 35 | 03+400 | 1.096,00 | 3,08 |
| 10 | 01+800 | 2.819,00 | -12,31 | 36 | 03+200 | 1.213,00 | 1,24 |
| 11 | 02+000 | 1.967,00 | -3,64 | 37 | 03+000 | 1.467,50 | 0,15 |
| 12 | 02+200 | 2.583,00 | -10,05 | 38 | 02+800 | 1.657,50 | -4,41 |
| 13 | 02+400 | 2.136,00 | -5,83 | 39 | 02+600 | 1.552,20 | -2,86 |
| 14 | 02+600 | 2.533,00 | -10,73 | 40 | 02+400 | 1.475,50 | 0,04 |
| 15 | 02+800 | 2.337,00 | -7,96 | 41 | 02+200 | 1.773,00 | -6,64 |
| 16 | 03+000 | 2.795,00 | -12,44 | 42 | 02+000 | 1.950,00 | -6,81 |
| 17 | 03+200 | 1.257,00 | 0,11 | 43 | 01+800 | 1.684,50 | -3,51 |
| 18 | 03+400 | 1.349,00 | 0,78 | 44 | 01+600 | 1.547,00 | -3,83 |
| 19 | 03+600 | 1.145,30 | 4,27 | 45 | 01+400 | 1.773,00 | -6,64 |
| 20 | 03+800 | 1.268,00 | 1,14 | 46 | 01+200 | 1.392,50 | 0,11 |
| 21 | 04+000 | 1.273,00 | 2,04 | 47 | 01+000 | 1.960,50 | -6,90 |
| 22 | 04+200 | 1.130,00 | 2,01 | 48 | 00+800 | 1.798,00 | -6,10 |
| 23 | 04+400 | 1.277,30 | 2,43 | 49 | 00+600 | 2.137,00 | -7,55 |
| 24 | 04+600 | 1.078,50 | 2,35 | 50 | 00+400 | 1.657,40 | -4,41 |
| 25 | 04+800 | 1.209,30 | 2,59 | 51 | 00+200 | 2.097,00 | -8,25 |
| 26 | 05+000 | 1.151,50 | 4,14 | 52 | 00+000 | 1.813,00 | -3,77 |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.17. Relación E* vs. DH



4.4. PROPUESTA FINAL DE DISEÑO DEL REFUERZO ESTRUCTURAL

Observando los resultados obtenidos en el gráfico 4.11. y 4.12., se obtienen los siguientes espesores a considerar para el refuerzo estructural:

Tabla 4.14. Espesores de refuerzos a considerar.

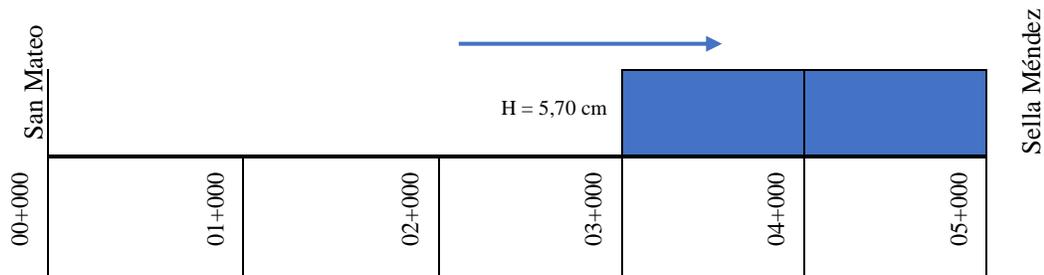
| Tramo entre progresivas | Espesores máximos de los tramos que requieren refuerzo estructural (cm) | | Espesores propuestos (cm) |
|--------------------------------|---|------------------|--|
| | Carril de Ida | Carril de Vuelta | |
| 00+000 a 01+000 | -9,97 | -3,77 | No requiere refuerzo |
| 01+000 a 02+000 | -3,64 | 0,11 | El refuerzo requerido es muy bajo (1,1 mm) |
| 02+000 a 03+000 | -5,83 | 0,04 | El refuerzo requerido es muy bajo (0,4 mm) |
| 03+000 a 04+000 | 4,27 | 4,01 | 4,50 |
| 04+000 a 05+000 | 4,14 | 5,62 | 5,70 |
| Espesor propuesto final | | | 5,70 cm |

Fuente: Elaboración propia.

De la anterior tabla, se deduce que en los 3 primeros kilómetros en estudio (desde progresiva 0+000 a 3+000), no requieren refuerzo estructural al ser menores de 3 mm, sin embargo, en los 2 últimos kilómetros (desde progresiva 3+000 a 5+000), sí requiere refuerzo estructural en ambos carriles, ida y vuelta.

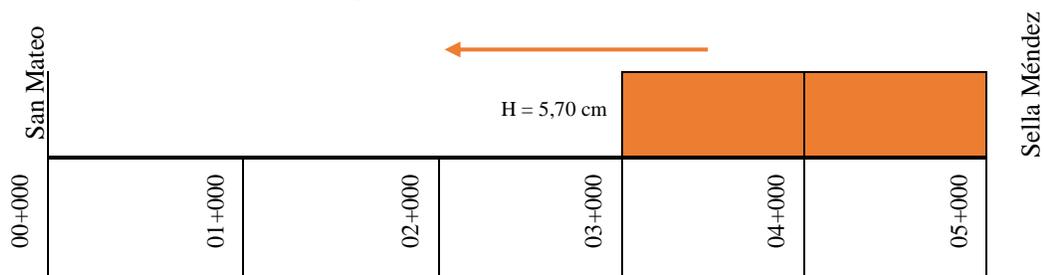
Según los resultados obtenidos por el método de Hogg, el refuerzo final propuesto, que para fines constructivos y dentro del margen de seguridad, se establece el mayor espesor determinado igual a 5,70 cm.

Gráfico 4.18. Esquema de propuesta de refuerzo del carril de ida.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.19. Propuesta de refuerzo del carril de vuelta.



Fuente: Elaboración propia.

El refuerzo del pavimento asfáltico puede triplicar la vida útil de los pavimentos de las carreteras al reducir la fatiga, la reflexión, el agrietamiento térmico y el asentamiento. Con una vida útil más larga y unos intervalos de mantenimiento más amplios, el “costo total de la vida” de un pavimento reforzado es menor que el de uno no reforzado.

4.5. ANÁLISIS DE COMPARACIÓN CON EL MODELO DE HOGG

4.5.1. Método del diseño de pavimentos (AASHTO-93) y DIPAV-2

Para aplicar el método AASHTO-93, fue necesario realizar algunos ensayos a las muestras que se obtuvieron del tramo, a través de calicatas, cuyos resultados se observan en la siguiente tabla:

Tabla 4.15. Resultados de CBR al 100%

| Carpeta estructural | CBR Punto 1 (%) | CBR Punto 2 (%) | CBR Punto 3 (%) |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Capa Base | 86,84 | 87,95 | 85,21 |
| Capa Sub Base | 40,82 | 41,41 | 30,60 |
| Capa Subrasante | 7,29 | 7,81 | 6,07 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.16. Resultados de CBR al 95%

| Carpeta estructural | CBR Punto 1 (%) | CBR Punto 2 (%) | CBR Punto 3 (%) |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Capa Base | 71,27 | 66,32 | 67,96 |
| Capa Sub Base | 36,42 | 35,00 | 28,68 |
| Capa Subrasante | 6,75 | 6,96 | 5,48 |

Fuente: Elaboración propia.

Después para determinar el número de ejes equivalentes, se realiza el aforo vehicular con los siguientes resultados:

Tabla 4.17. Resultados del aforo vehicular.

| Estudio de tráfico ida y vuelta | | | | | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|---------------|-------------|
| Día | Motos | Autos | Buses | Camiones C2G | C3-C4 | C5 |
| 1 | 106 | 440 | 13 | 100 | 237 | 0 |
| 2 | 101 | 438 | 11 | 95 | 240 | 0 |
| 3 | 106 | 429 | 12 | 89 | 245 | 0 |
| 4 | 108 | 437 | 15 | 102 | 224 | 0 |
| 5 | 110 | 444 | 13 | 96 | 231 | 0 |
| 6 | 92 | 451 | 2 | 89 | 16 | 0 |
| 7 | 90 | 442 | 3 | 90 | 18 | 0 |
| Prom. TPD X tipo | 101,86 | 440,14 | 9,86 | 94,43 | 173,00 | 0,00 |
| TPD total | | 717,43 | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Luego se determinó el número de ejes equivalentes (ver anexo), y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.18. Resultados de ejes equivalentes (W18).

| Periodo de retorno | W18 |
|--------------------|---------|
| 6 años | 1209357 |
| 10 años | 2143327 |

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos del Método de diseño AASTHO-93, se detallan en las siguientes tablas:

Tabla 4.19. Resumen de resultados obtenidos para un periodo actual.

| Carpeta estructural | Espesor calculado(in) | Espesor calculado(cm) | Espesor constructivo(cm) | Espesor determinado(cm) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|
| Capa de rodadura | 5,68 | 14,427 | 15 | 5 |
| Capa base | 2,94 | 7,467 | 10 | 20 |
| Capa subbase | 2,87 | 7,289 | 10 | 10 |
| Total | - | 29,184≈30 | - | 35 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.20. Resumen de resultados obtenidos para un periodo de 10 años.

| Carpeta estructural | Espesor calculado(in) | Espesor calculado(cm) | Espesor constructivo(cm) | Espesor determinado(cm) |
|----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Capa de rodadura | 6,23 | 15,824 | 20 | 5 |
| Capa base | 3,30 | 8,382 | 10 | 25 |
| Capa subbase | 3,75 | 9,525 | 10 | 10 |
| Total | - | 33,731≈35 | - | 40 |

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2. Comparación de métodos

A). Método del modelo de Hogg

HD = 5,70 cm

Espesor de sobre carpeta, $D_{01} = 2,24$ pulg

B). Método del factor de condición

Espesor de carpeta de asfalto, $D_1 = 6\text{cm} = 2,3622$ pulg

Coefficiente estructural, $a_1 = 0,440$

Espesor de carpeta de asfalto, $D_2 = 15\text{cm} = 5,9055$ pulg

Coefficiente estructural, $a_2 = 0,109$

Coefficiente de drenaje, $m_2 = 1$

Espesor de carpeta de asfalto, $D_3 = 20\text{cm} = 7,8740$ pulg

Coefficiente estructural, $a_3 = 0,103$

Coefficiente de drenaje, $m_3 = 1$

$SN_{ef} = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * M_2 + a_3 * D_3 * m_3$

$SN_{ef} = 0,440 * 2,3622 + 0,109 * 5,9055 * 1 + 0,103 * 7,8740 * 1$

$SN_{ef} = 2,49$

$$\text{Espesor de sobre carpeta, Dol} = \frac{SN_{ol}}{a_{ol}} = \frac{(SN_f - S_{Neff})}{a_{ol}}$$

$$\text{Espesor de sobre carpeta, Dol} = \frac{(4,13 - 2,49)}{0,440}$$

$$\text{Espesor de sobre carpeta, Dol} = 3,73 \text{ pulg} = 9,47 \text{ cm}$$

C). Método de vida remanente

ESALs pasados desde habilitación al tráfico, $N_p = 2143327$

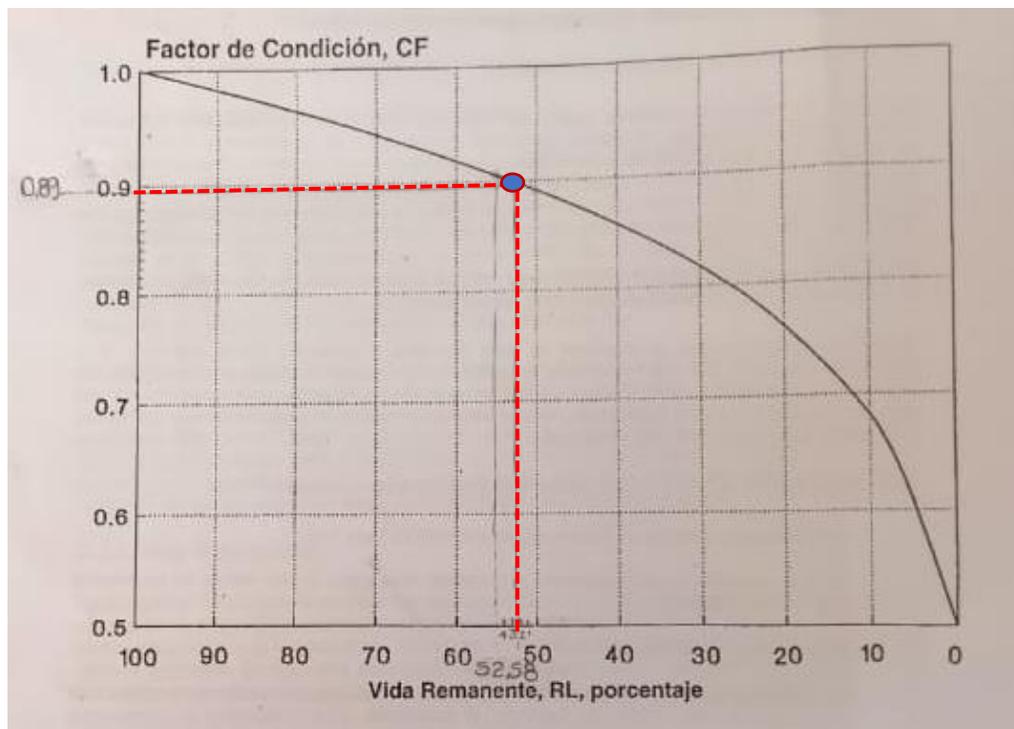
ESALs hasta falla del pavimento existente, $N_{1,5} = 4520000$

Capacidad estructural futura, $SN_f = 4,13$

$$\text{Vida remanente (\%)} = 100 * \left(1 - \frac{N_p}{N_{1,5}}\right)$$

$$\text{Vida remanente (\%)} = 100 * \left(1 - \frac{2143327}{4520000}\right)$$

$$\text{Vida remanente (\%)} = 52,58$$



Factor de condición, $CF = 0,89$

Espesor de carpeta de asfalto, $D_1 = 6\text{cm} = 2,3622$ pulg

Coefficiente estructural = 0,440

Espesor de carpeta de asfalto, $D_2 = 15\text{cm} = 5,9055$ pulg

Coefficiente estructural, $a_2 = 0,109$

Coefficiente de drenaje, $m_2 = 1$

Espesor de carpeta de asfalto, $D_3 = 20\text{cm} = 7,8740$ pulg

Coefficiente estructural, $a_3 = 0,103$

Coefficiente de drenaje, $m_3 = 1$

$$SN_o = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * M_2 + a_3 * D_3 * m_3$$

$$SN_o = 0,440 * 2,3622 + 0,109 * 5,9055 * 1 + 0,103 * 7,8740 * 1$$

$$SN_o = 2,49$$

$$SN_{ef} = CF * SN_o$$

$$SN_{ef} = 0,89 * 2,49$$

$$SN_{ef} = 2,22$$

$$\text{Espesor de sobre carpeta, } Dol = \frac{SN_o}{a_o} = \frac{(SN_f - SN_{ef})}{a_o}$$

$$\text{Espesor de sobre carpeta, } Dol = \frac{(4,13 - 2,22)}{0,440}$$

$$\text{Espesor de sobre carpeta, } Dol = 4,34 \text{ pulg} = 11,02 \text{ cm}$$

La tabla presenta resultados sobre el espesor de la sobre carpeta utilizando tres métodos diferentes: HOGG, FACTOR CONDICION y VIDA REMANENTE. Este análisis se centra en evaluar la consistencia y la validez de los resultados obtenidos.

Tabla 4.21. Resumen de resultados obtenidos para el espesor de sobre carpetas.

| Método | S _{Nef} | Espesor de la sobre carpeta (pulg) | Espesor de la sobre carpeta (cm) |
|------------------|------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Hogg | 2,24 | 2,24 | 5,70 |
| Factor Condición | 2,49 | 3,73 | 9,47 |
| Vida remanente | 2,22 | 4,34 | 11,02 |

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de S_{Nef} son relativamente consistentes entre los métodos, lo que indica que todos están midiendo características similares del material. Sin embargo, los espesores presentan discrepancias significativas.

Es fundamental considerar cómo se han calculado los espesores. Las diferencias en los resultados podrían deberse a variaciones en las condiciones de prueba, en la metodología utilizada.

4.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA DETERMINAR LA CONFIABILIDAD DE LOS RESULTADOS

4.6.1. Prueba de t-Student

Los resultados obtenidos de la Capacidad portante de la sub rasante del suelo (CBR), se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 4.22. Resumen de resultados obtenidos de la Capacidad portante de la sub rasante del suelo CBR_{Laboratorio} y CBR_{Hogg}.

| Punto N° | CBR _{Laboratorio} | CBR _{Hogg} |
|----------|----------------------------|---------------------|
| Punto 1 | 6,75 | 7,09 |
| Punto 2 | 6,96 | 6,11 |
| Punto 3 | 5,48 | 5,80 |

Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis para la estadística:

Hipótesis: Los resultados del CBR de laboratorio no tiene relación con el CBR del método Hogg.

Hipótesis nula: Los resultados del CBR de laboratorio tienen relación con el CBR del método Hogg.

4.6.2. Cálculos de la Prueba de t-Student

a) Cálculo de la Media

CBR de Laboratorio:

$$\text{Medio} = \frac{6,75+6,96+5,48}{3} = \frac{19,19}{3} \approx 6,40$$

CBR de Hogg:

$$\text{Medio} = \frac{7,09+6,11+5,80}{3} = \frac{19,00}{3} \approx 6,33$$

b) Cálculo de la Varianza

CBR de Laboratorio:

$$\begin{aligned} \text{varianza} &= \frac{(6,75 - 6,40)^2 + (6,96 - 6,40)^2 + (5,48 - 6,40)^2}{3 - 1} \\ &= \frac{(0,335)^2 + (0,56)^2 + (-0,92)^2}{2} = \frac{0,1225 + 0,3136 + 0,8464}{2} \\ &\approx 0,63025 \end{aligned}$$

CBR de Hogg:

$$\begin{aligned} \text{varianza} &= \frac{(7,09 - 6,33)^2 + (6,11 - 6,33)^2 + (5,80 - 6,33)^2}{3 - 1} \\ &= \frac{(0,76)^2 + (-0,22)^2 + (-0,53)^2}{2} = \frac{0,5776 + 0,0484 + 0,2809}{2} \\ &\approx 0,453 \end{aligned}$$

c) Cálculo de la Desviación Estándar

CBR de Laboratorio:

$$\text{Desviación Estándar} = \sqrt{0,63025} \approx 0,79$$

CBR de Hogg:

$$\text{Desviación Estándar} = \sqrt{0,453} \approx 0,67$$

d) Cálculo de la Estadística T

$$T = \frac{\text{Medio1} + \text{Medio2}}{\sqrt{\frac{\text{Var1}}{n1} + \frac{\text{Var2}}{n2}}}$$

Reemplazando los valores:

$$T = \frac{5,40 + 6,33}{\sqrt{\frac{0,63025}{3} + \frac{0,453}{3}}} = \frac{0,07}{\sqrt{0,21008 + 0,151}} = \frac{0,07}{\sqrt{0,36108}} = \frac{0,07}{0,6}$$

$$T \approx 0,117$$

e) Grados de libertad

$$Df = n_1 + n_2 - 2$$

$$Df = 3 + 3 - 2$$

$$Df = 4$$

f) Comparación con el valor crítico

La tabla t-Student para diferentes grados de libertad y un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ y $Df = 4$, el valor crítico es aproximadamente 2,776.

| Grados de Libertad (df) | Valor crítico t ($\alpha = 0.05$) |
|-------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 12.706 |
| 2 | 4.303 |
| 3 | 3.182 |
| 4 | 2.776 |
| 5 | 2.571 |
| 6 | 2.447 |
| 7 | 2.365 |
| 8 | 2.306 |
| 9 | 2.262 |
| 10 | 2.228 |
| 11 | 2.201 |
| 12 | 2.179 |
| 13 | 2.160 |
| 14 | 2.145 |
| 15 | 2.131 |
| 16 | 2.120 |
| 17 | 2.110 |
| 18 | 2.101 |
| 19 | 2.093 |
| 20 | 2.086 |

Interpretación:

Para $Df = 4$, el valor crítico t es aproximadamente **2,776**.

Si el valor t calculado es menor que 2,776; no se rechaza la hipótesis nula.

g) Toma de Decisión

Valor t calculado: 0,117

Valor crítico: 2,776

Dado que $0,117 < 2,776$, no rechazamos la hipótesis nula.

h) Resultado final

El valor calculado de T es 0,117 y resulta menor al valor crítico $t = 2,776$, por tanto, no se rechaza la hipótesis nula, es decir se acepta la hipótesis nula, por lo tanto, los resultados del CBR de laboratorio tienen relación con el CBR del método Hogg.

4.7. ANÁLISIS DE COSTOS

Se calculó el costo del recapamiento por kilómetro de vía, con un ancho de calzada de 7 m y un espesor de 0,06m. Para esto se determinó la cantidad de m^3 que represente el material por kilómetro y se multiplico por su costo unitario en m^3 .

Tabla 4.23. Resumen de resultados del Costo unitario de construcción por m^3 .

| Datos | Unidad | Precio unitario (Bs/m ³) |
|--------------|--------|--------------------------------------|
| Recapamiento | m^3 | 68,97 |

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Recapamiento (Bs/km)} = (7m * 0,06m * 1000m) * (68,97Bs/m^3)$$

Tabla 4.23. Resumen de resultados del Costo unitario de construcción por kilómetro.

| Datos | Unidad | Costo total (Bs/km) |
|--------------|----------|---------------------|
| Recapamiento | m^3/km | 28.967,4 |

Fuente: Elaboración propia.

Como se observan los resultados el costo total de la sobre carpeta es 28.967,4 Bs/Km. Y según los resultados de la evaluación estructural del pavimento, existen tramos que requieren un refuerzo estructural.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas de la presente investigación son:

- ❖ Se realizó la toma de datos de campo haciendo uso de la viga Benkelman para determinar en gabinete la deflexión máxima y la deflexión a 50 cm de cada punto en estudio cada 200 m, es decir, 26 puntos por el carril de ida y 26 puntos por el carril de vuelta, haciendo un total de 52 puntos de lecturados.
- ❖ Se logra concretar los objetivos de la presente investigación, determinando el módulo de elasticidad de la subrasante, el CBR de la subrasante y el refuerzo estructural requerido del tramo San Mateo – Sella Méndez.
- ❖ Después de determinar las deflexiones máximas y las deflexiones a 50 cm con la viga Benkelman, se observan en los resultados que hay una tendencia de menor deflexiones entre las progresivas 00+000 a 03+000 tanto en el carril de ida como en el carril de vuelta y entre las progresivas 03+000 a 05+000 las deflexiones son más elevadas también en ambos carriles.
- ❖ El modelo matemático de Hogg, demuestra que con la viga Benkelman es posible determinar el módulo de elasticidad y CBR de la subrasante, proporcionando resultados que dependen de las deflexiones máximas y las deflexiones a 50 cm.
- ❖ Al determinar el módulo de elasticidad de la subrasante también es posible determinar el módulo de elasticidad equivalente del pavimento, cuyo valor junto con el espesor existente del paquete estructural, permite determinar el refuerzo estructural.

- ❖ Los resultados del espesor del refuerzo estructural varían en el tramo, desde la progresiva 00+000 a la progresiva 03+000, en ambos carriles no requieren refuerzo estructural, sin embargo, desde la progresiva 03+000 a la progresiva 05+000, requiere refuerzo estructural en ambos carriles igual a 5,70 cm.
- ❖ El valor calculado de t-Student, es menor que el valor crítico, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, lo que sugiere que no hay una diferencia significativa entre los valores de CBR de laboratorio y de CBR de Hogg, se relacionan.
- ❖ Así mismo, en el punto 1 el CBR del laboratorio es 6,75% menor al CBR que proporciona Hogg de 7,09%. En el punto 2 el CBR del laboratorio es 6,96% mayor al CBR que proporciona Hogg de 6,11%. En el punto 3 el CBR del laboratorio es 5,48% menor al CBR que proporciona Hogg de 5,80%. Como se observa en algunos puntos el CBR de laboratorio es menor y en otro es mayor al CBR de Hogg, por tanto, para validar los resultados es necesario realizar un estudio estadístico.
- ❖ Los métodos analizados muestran variaciones significativas en el espesor de la sobre carpeta. La elección del método puede influir en la durabilidad y el rendimiento de la sobre carpeta, lo que es crucial para la planificación y ejecución de proyectos de construcción.
- ❖ Se calculo el precio unitario y costo total del refuerzo estructural. El costo total no solo refleja el gasto monetario asociado al proyecto, sino que también es una herramienta esencial para la planificación, ejecución y control de cualquier obra.

5.2. RECOMENDACIONES

Se proponen las siguientes recomendaciones:

- ❖ Recabar información precisa y con responsabilidad del tramo en estudio, porque los valores proporcionados son los que definen el espesor del refuerzo estructural y por ende la inversión pública requerida.
- ❖ Cumplir con los requisitos previos para realizar el ensayo con la viga Benkelman, es decir cumplir con el peso de la volqueta en el eje trasero de 8,2 toneladas, la presión de inflado de las llantas de 80 psi y la distancia de lectura cada 50 cm.
- ❖ Aplicar adecuadamente los conceptos y valores que proporciona el modelo matemático de Hogg, según parámetros propios del modelo, para generar confianza en los resultados obtenidos.
- ❖ Desarrollar un modelo de cálculo en planillas Excel porque existe una parte del procedimiento de cálculo que requiere iteración, porque la ecuación del módulo de elasticidad equivalente del pavimento depende de varios valores y fórmulas hasta igualar con el resultado de la deflexión máxima.
- ❖ Se sugiere realizar un análisis más profundo de cada método para determinar cuál es el más adecuado según las condiciones específicas del proyecto.
- ❖ Considerar la implementación de un control de calidad más riguroso para asegurar que el espesor de la sobre carpeta cumpla con las especificaciones requeridas.