

CAPITULO I:

INTRODUCCION

1.1. ANTECEDENTES

Según Hoffman y Thompson (1981), la evaluación estructural es un problema complejo debido a la multiplicidad de materiales que conforman el pavimento y a la variación de las propiedades asociada a parámetros como temperatura, cargas, humedad, etc., el análisis de la deflexión que sufre la subrasante se realizara teniendo en cuenta la estructura de pavimento flexible que se encuentra constituida por una capa de rodadura asfáltica, una capa de base granular y una capa de subbase granular, apoyado todo el paquete estructural sobre la subrasante, se han realizado diversas investigaciones donde se ha podido encontrar que la deflexión máxima por sí sola no es suficiente para determinar la condición estructural de la capa de fundación de un pavimento ni para realizar el retrocálculo de los módulos de las capas que lo componen (Horak, 1987), el cuenco de deflexión se caracteriza por la deflexión a nivel de la subrasante; la deflexión en el eje del sistema de carga y la determinación del Índice de Curvatura Superficial (I. C. S.). También se presenta el análisis de deflexiones que caracterizan los cuencos en estructuras de pavimentos flexibles a partir de los cuales se llega a obtener el módulo resiliente de la subrasante, para dar referencia al comportamiento de la capa de fundación ante las cargas transmitidas por el tráfico vehicular.

La evaluación estructural de pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad portante del sistema pavimento-subrasante en una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al fin de su vida útil, cuando sea necesario verificar las condiciones en las que se encuentra o cuando el pavimento va a cambiar su función. Las necesidades de evaluar estructuralmente los

pavimentos de una red aumentan a medida que se completa el diseño y la construcción de una red vial nacional o departamental y consecuentemente aumenta la necesidad de su preservación y rehabilitación.

Una condición importante a ser considerada cuando un pavimento está siendo proyectado es verificar si la estructura de multi-capas es capaz de soportar las intensidades de las cargas que se solicitarán durante un período de proyecto estimado.

A nivel mundial se cuenta con una gran cantidad de equipos para determinar deflexiones en campo, uno de ellos es la viga Benkelman, este equipo aplica una sollicitación al pavimento por carga y determina un cuenco de deformaciones a partir de datos de desplazamiento. Los equipos que se utilizan son establecidos en función del tipo de pavimento que se intenta evaluar y del fin que se persiga con la evaluación.

La medida de las deflexiones, como respuesta de un firme flexible ante la aplicación de una carga sobre la superficie del pavimento, es la base de la mayoría de los procesos de evaluación estructural existentes hoy en día. Aunque existen otras medidas que pueden dar una idea del estado estructural del firme, la deflexión en superficie es, sin duda, la que ofrece las posibilidades de análisis más amplias, por otro lado, la medición de estos aspectos en las obras viarias es una tarea ardua y técnicamente compleja.

El desarrollo de soluciones para modelos matemáticos de pavimentos, la simpleza, rapidez y economía de las mediciones de deflexiones y, el carácter no destructivo de los ensayos, han contribuido al auge de las metodologías de evaluación estructural de pavimentos en los últimos años.

Por otro lado, es necesario tomar en cuenta los factores que en mayor medida influyen a los resultados obtenidos y la manera en que se deben considerar; un

ejemplo lo constituye el clima, caracterizado como la temperatura y la humedad; en este caso, la magnitud de la carga, la posición o distancia de la capa rígida, etc.

1.2. JUSTIFICACION

Para la medición de la deflexión que se presenta en un pavimento se conocen diferentes tipos de ensayos ya sean de procedimiento directo como indirecto, estos ensayos nos permiten medir la deformación elástica del pavimento cuando este es sometido a una carga, la medición de este cuenco utilizando equipos no destructivos es una técnica eficaz que permite identificar los criterios de intervención en la red vial, optimizando los recursos técnicos y económicos se planteara la utilización de los parámetros de deflexión como indicadores del estado estructural de las capa granular de la subrasante, se realizaron mediciones del cuenco de deflexiones en tramos de pavimentos con diferentes niveles de daño en todo el tramo a analizar.

En la actualidad, la obtención de parámetros resistentes que definan las características del pavimento existente requiere de un trabajo laborioso y un análisis. Gracias a la ayuda de modelos matemáticos, se puede realizar una captura de datos con equipos que generan grandes beneficios, por el ahorro de tiempo, que además proveen gran fiabilidad en las mediciones, con un grado de error cada vez menor.

La evaluación del pavimento mediante equipos de alto rendimiento proporcionan información precisa y cuantitativa sobre el estado de las características estructurales y superficiales, lo que, apoyado en programas de procesamiento, representa la tecnología más avanzada del primer mundo. Sin embargo, estos equipos son altamente costosos, y muchas veces las carreteras estudiadas no justifican su uso, y no puede despreciarse la información que ofrecen los equipos de bajo costo, como es la viga Benkelman por lo que para la evaluación de las características estructurales del pavimento se procede a utilizar modelos matemáticos.

1.3. DISEÑO TEORICO

1.3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Cuál es el procedimiento que se debe seguir para la evaluación del estado estructural de un pavimento flexible a través del módulo resiliente, basado en la medida de deflexiones con la viga Benkelman?

1.3.2. SITUACION PROBLEMICA

El efecto de un vehículo que circula sobre un pavimento genera cargas que se transmiten desde sus ruedas hasta la estructura es decir desde la superficie del pavimento hasta la suelo de fundación, que es la subrasante causando un efecto de deformación acumulativa que resulta de la deformación que el pavimento sufre bajo la acción de la llanta que pasa, dicha deformación se recupera parcialmente cuando la llanta deja de oprimir, pero tal recuperación nunca es total, siempre queda un remanente, que conduce a una deformación permanente, la cual dificulta la marcha de los vehículos, aumentando su costo operativo y, eventualmente, contribuye a la ruptura y agrietamiento de la carpeta asfáltica, cuando el tránsito empieza a crecer, en número y peso, tal como parece que ha de suceder en la mayoría de las carreteras, el concepto de módulo resiliente está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida que se produce en la estructura del pavimento por la acción de los vehículos que circulan en esta.

1.3.3. OBJETIVOS

1.3.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un procedimiento que permita evaluar el estado estructural de un pavimento flexible, basado en la medida de deflexiones con la viga Benkelman siguiendo un modelo matemático para la obtención del módulo

resiliente, donde se utilice parámetros como las condiciones de carga y tipo de ambiente propio del tramo Cruce Santa Bárbara-Túnel Falda la Queñua.

1.3.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Elaborar la metodología para realizar la evaluación estructural del pavimento a partir del módulo resiliente utilizando el equipo de la viga Benkelman.
- Ubicar el tramo y número de ensayos a lo largo de la carretera a través de un método no destructivo como lo es el de la Viga Benkelman para obtener la medición de las deflexiones del pavimento.
- Calcular las deflexiones a partir de las lecturas obtenidas realizando las correcciones por temperatura y estacionalidad ya que influye en la deformación del pavimento.
- Determinar el cálculo del radio de curvatura a partir del punto máximo de deflexión y obtener la deflexión característica que representa la magnitud de deformación de los pavimentos.
- Calcular el módulo resiliente a partir del modelo matemático de Hogg para cada uno de los puntos donde se realizó el ensayo de la viga Benkelman.
- Realizar el ensayo CBR relación soporte del suelo en laboratorio a través de una muestra obtenida de la subrasante como un método de validación para nuestro ensayo.
- Establecer las conclusiones y recomendaciones al culminar la investigación.

1.3.4. HIPOTESIS

Si empleamos el deflectómetro Benkelman, de acuerdo a procedimientos estandarizados, este no medirá la deformación elástica del pavimento en un proceso de carga directa sino que, partiendo de un estado inicial en que el pavimento se encuentra cargado, mide la recuperación que este experimenta al ser descargado progresivamente, entonces de acuerdo a este ensayo se definirá el cuenco de

deflexiones y se podrá realizar una evaluación al módulo resiliente de la capa de fundación de la estructura del pavimento flexible de un tramo determinado.

1.3.5. VARIABLES

1.3.5.1. VARIABLE DEPENDIENTE

Evaluación del Módulo Resiliente de la capa de fundación.

1.3.5.2. VARIABLE INDEPENDIENTE

Deflexión recuperada medida de la estructura del pavimento flexible.

1.3.6. ALCANCE

Con el fin de evaluar el módulo resiliente se tiene la necesidad de indagar en los conceptos básicos que formaran parte de la investigación se tomaran como palabras claves, es decir como palabras que servirán para definir el fin del proyecto el Módulo resiliente, cuenco de deflexiones, pavimentos flexibles y el deflectómetro Benkelman, a través de estas palabras definiremos el desarrollo del proyecto y los resultados que esperamos obtener al concluir la evaluación.

Es importante tener una amplia definición propia de lo que es un pavimento flexible, su estructura, sus propiedades y la deflexión que sufre la misma debido al tránsito vehicular, para esto es necesario realizar una evaluación de pavimentos más profundamente de su capa de fundación ya sea por métodos directos o indirectos o como también suele decirse destructivos y no destructivos es importante destacar la utilidad de equipos de campo para la evaluación de la capacidad estructural de los pavimentos.

Para esta investigación se utilizara el deflectómetro conocido como la viga Benkelman que puede propiciar la obtención rápida de información útil sobre la resistencia a la deformación de un pavimento, este instrumento funciona según el

principio de una palanca, donde uno de los extremos se apoya en el pavimento deformado ante la aplicación de una carga, mientras que el otro está en contacto sensible con una deformímetro de precisión. Dicha información se puede correlacionar con otras mediciones realizadas y coeficientes que se utilizan en el ajuste de la curvatura del cuenco. Los valores de deflexión obtenidos a partir de una interpretación cuidadosa, y utilizando un modelo matemático como lo es el de Hogg nos permite estimar el módulo resiliente de la subrasante de la sección estructural del pavimento, realizando la evaluación de la estructura en general a partir del cuenco de deflexiones, el tipo de deflexión que se presenta, el radio de curvatura superficial y el módulo resiliente de la capa de fundación.

1.4. DISEÑO METODOLOGICO

1.4.1. UNIDAD

La unidad a estudiarse es la estructura del pavimento flexible, se tomara en cuenta la información del proyecto inicial, el mismo tiene su inicio de trayectoria en el Túnel Falda la Queñua en la progresiva 2+030 hasta terminar en el departamento de Tarija en el cruce de la carretera San Lorenzo Comunidad del Rancho en la progresiva 31+687.

1.4.2. POBLACION

Para probar la metodología que se propone, como resultado de este trabajo, se ha previsto la evaluación tramo Túnel Falda la Queñua-Cruce Santa Bárbara, que cuenta con una longitud de 29,657 Km de longitud, lo que representa la población objeto de estudio.

El caso de estudio, presenta una estructura formada por una capa de rodadura asfáltica, una base granular, una subbase granular y la capa de fundación. Para obtener la información sobre el estado del pavimento, se analizará una muestra

formada por la deflexión elástica recuperada obtenida a lo largo del trazado, separados cada 80m.

1.4.3. MUESTRA

Dentro de la evaluación estructural que se realiza a un pavimento existen diversos métodos destructivos y no destructivos, donde se tiene por objeto la cuantificación de la capacidad estructural remanente del pavimento es por ello que se realizara un ensayo no destructivo como el ensayo de la viga Benkelman para la evaluación del pavimento.

1.4.4. METODOS

ENSAYO DE LA VIGA BEKELMAN

El ensayo de la Viga Benkelman es un método no destructivo el mismo se utilizara en el tramo Cruce – Túnel Falda la Queñua para medir las deflexiones desde la superficie del pavimento hasta el suelo de fundación, es un instrumento que funciona según el principio de una palanca, uno de cuyos extremos se apoya en el pavimento deformado ante la aplicación de una carga, mientras que el otro está en contacto sensible con un deformimetro de precisión, con dial de lecturas graduadas en centésimas de (mm), dependiendo de la relación de brazos del equipo y de la factibilidad que el dial proporcione la verdadera magnitud de las medidas, en forma automática, se establece si es necesario corregir o no las lecturas. La carga de ensayo, de orden 18.000 libras, le proporcionara al eje posterior simple de llanta doble de un camión. La presión de inflado de las llantas debe verificarse en 80 psi, eventualmente la carga usada en los ensayos puede tener una variación en el orden $\pm 1\%$. El deflectómetro Benkelman, de acuerdo a procedimientos estandarizados, no mide la deformación elástica del pavimento en un proceso de carga directa sino que, partiendo de un estado inicial en que el pavimento se encuentra cargado, mide la recuperación que este experimenta al ser descargado progresivamente.

MODELO DE HOGG

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

1.4.5. RESULTADOS

A partir de los datos obtenidos del ensayo de la Viga Benkelman se procederá a realizar los cálculos de la deflexión y las correcciones por temperatura y estacionalidad. Al obtener las deflexiones siguiendo el modelo de Hogg se calculara el módulo resiliente y a partir de este se realizara un análisis de la capacidad estructural del suelo de fundación del pavimento verificando su estabilidad y si el mismo será capaz de responder eficientemente ante la demanda de tráfico proyectado en el lapso restante de vida.

1.4.6. METODOS ESTADISTICOS

Se realizara el método estadístico descriptivo, es decir, se establecerá un programa sucesivo determinando los objetivos a través de un estudio de muestras que se obtendrán del ensayo de la viga Benkelman. Como ser:

MEDIA ARITMÉTICA: La media aritmética de una variable se define como la suma ponderada de los valores de la variable por sus frecuencias relativas y lo denotaremos por \bar{x} y se calcula mediante la expresión:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n X_i * f_i = \sum_{i=1}^n \frac{x_i * n_i}{N}$$

x_i representa el valor de la variable o en su caso la marca de clase.

DESVIACIÓN TÍPICA: Es la raíz cuadrada de la varianza, se denota por S_x o s_x .

$$S_x = \sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{d_i^2 * n_i}{N}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{X_i^2 * n_i}{N} - \bar{X}^2}$$

Este estadístico se mide en la misma unidad que la variable por lo que se puede interpretar mejor.

MEDIANA: Con esta medida podemos identificar el valor que se encuentra en el centro de los datos, es decir, nos permite conocer el valor que se encuentra exactamente en la mitad del conjunto de datos. Esta medida nos indica que la mitad de los datos se encuentran por debajo de este valor y la otra mitad por encima del mismo. Para determinar la posición de la mediana se utiliza la fórmula:

$$Me = L_i + \frac{\frac{N}{2} - F_{i-1}}{f_i} * a_i$$

Dónde:

L_{i-1} , es el límite inferior de la clase donde se encuentra la mediana.

$N/2$, es la semisuma de las frecuencias absolutas.

F_{i-1} , es la frecuencia acumulada anterior a la clase mediana.

a_i , es la amplitud de la clase.

CAPITULO II:

ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LA INVESTIGACION

2.1.ASFALTOS MODIFICADOS

Los asfaltos convencionales tienen limitaciones en su respuesta ante cargas y solicitaciones climáticas extremas y su utilización en algunas situaciones puede presentar problemas importantes.

Además la agresividad y cantidad del tránsito de vehículos sobre las carreteras se ha incrementado notablemente en el tiempo, sin mostrar signos de que este crecimiento disminuirá en el futuro. En consecuencia, se hace necesario un esfuerzo continuo de búsqueda y desarrollo de materiales más resistentes, que mejoren las características de las carreteras, alarguen su periodo de servicio y disminuyan los costos de conservación.

Actualmente, los asfaltos modificados han mostrado plenamente su capacidad para mejorar el comportamiento de los ligantes convencionales.

La modificación del asfalto a través de aditivos es una técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías esta técnica consiste en algunas ocasiones, en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular).

- En 1873 se registró la primera patente de asfalto modificado con caucho.

- En 1902 en Francia se extiende por primera vez asfalto modificado con caucho.

Aunque en una mezcla el asfalto sea monitoreado en proporción, sus propiedades pueden influir de manera significativa en su comportamiento. El tipo de mezcla será el que, en gran medida, determine la contribución hecha por el asfalto sobre todo el conjunto. Generalmente, las propiedades de la mezcla con granulometría continua dependen del enclavamiento o trabazón del agregado pétreo, mientras que las preparadas con altos contenidos de mortero asfáltico dependen más de la rigidez de la proporción de asfalto, polvo mineral y arena.

A altas temperaturas de servicio, puede que el asfalto llegue a reblandecerse, facilitando la deformación de la mezcla (ahuellamiento, FIGURA 1). El riesgo de aparición de estas deformaciones es aún mayor en pavimentos sometidos a la circulación de vehículos pesados. De manera generalizada y sin tener en cuenta otros factores que puedan influir, se puede disminuir la probabilidad de aparición de estas deformaciones aumentando la rigidez del ligante mediante el empleo de un asfalto más duro.

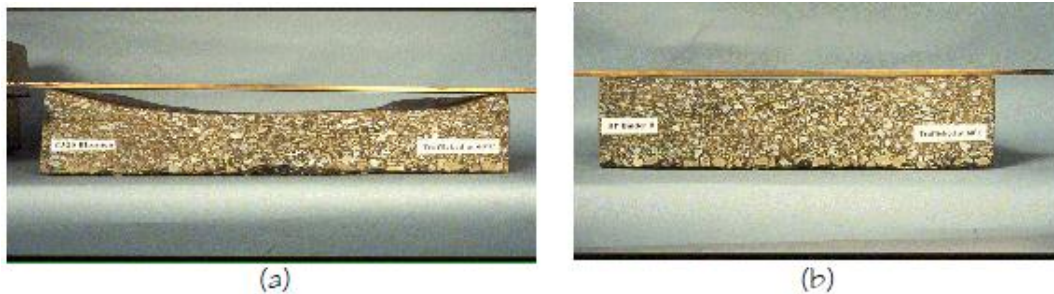


FIGURA 1: DIFERENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS CON ASFALTO CONVENCIONAL(a) Y ASFALTO MODIFICADO (b)

Por otro lado a temperaturas de servicio bajas, el ligante se vuelve relativamente rígido y va perdiendo poder de resistencia a las tensiones, volviéndose frágil y siendo susceptible de fisuraciones. El grado de susceptibilidad a la fisuración está relacionado con la dureza del asfalto y su capacidad para absorber las sollicitaciones inducidas por el tráfico, disminuyendo la dureza del asfalto, se minimizara el riesgo de fallo por fragilidad.

Entonces, debido a lo dicho anteriormente, a la hora de buscar comportamientos globales satisfactorios de las mezclas bituminosas, la elección del asfalto adecuado para cada tipo de mezcla se vuelve un compromiso entre ambos extremos; ahuellamiento a altas temperaturas y fisuramiento a por fragilidad térmica a bajas temperatura. Donde mejorando el comportamiento a altas temperaturas, se influye negativamente en el comportamiento a bajas temperaturas.

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos, es contar con ligantes mas viscosos a temperaturas elevadas para reducir la deformación permanente (ahuellamiento), de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumáticos, que sin sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación. Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que aumenta la adherencia entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándolo aún en presencia de agua, aumentando de esa manera la resistencia a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga reduciendo el agrietamiento como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo.

2.2.PAVIMENTOS FLEXIBLES

DEFINICIÓN DE PAVIMENTOS

- Del latín PAVIMENTUM, el pavimento es la capa o base que constituye el suelo de una construcción o de una superficie no natural.
- Revestimiento de cualquier material que va sobre el piso que no permite la formación de polvo o lodo.
- Estructura construida sobre la subrasante de la vía, para resistir y distribuir los esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Por lo general está conformada por las siguientes capas: subbase, base y rodadura.
- Un pavimento puede definirse como una estructura o sistema estructural formado por un conjunto de capas de materiales y dimensiones apropiados, comprendidas entre el nivel superior del terreno de fundación o subrasante y la superficie de rodamiento o rodadura, cuyas funciones fundamentales son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura adecuados, resistente a la acción del tránsito (como carga o acción principal), de la intemperie y otros agentes perjudiciales, así como transmitir adecuadamente los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito a las terracerías y suelo de fundación.

Es decir, el pavimento es la superestructura de una vía de comunicación (carretera, calle o aeropista), que hace posible el tránsito de vehículos y aeronaves con la comodidad, seguridad y economía, previstos en la etapa de planificación y diseño del proyecto.

CLASIFICACIÓN DE CARRETERAS SEGÚN SU RODADURA

Las capas de un pavimento están compuestas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente, desde el punto de vista de diseño los pavimentos flexibles están formados por una serie de capas y la distribución de la carga está determinada por las características propias del sistema.

Aunque, la rigidez o flexibilidad de un pavimento no es fácil de definir tan apropiadamente como para establecer una diferencia precisa entre ambos tipos. Esta clasificación sirve con fines prácticos y es muy usada en el mundo de la ingeniería.

Pavimentos Rígidos

Los pavimentos rígidos son aquellos que están constituidos, generalmente, por una losa de hormigón hidráulico, apoyada sobre el suelo de fundación (subrasante) o sobre una capa de material seleccionado denominada subbase, cuando la subrasante o suelo de fundación tenga una calidad suficientemente buena, la losa de hormigón puede disponerse directamente sobre el mismo, prescindiéndose de la subbase tratando de que la losa de hormigón tenga un apoyo suficientemente uniforme, estable y resistente. Es una estructura conformada por losas de hormigón de cemento hidráulico, se encuentra construido con hormigón, es decir, cemento, agregado grueso, agregado fino y agua.

Existen diferentes tipos de hormigón:

- Simple o monolítico
- Simple con dovelas o barras de transferencia
- Con refuerzo discontinuo distribuido sin función estructural

- Con refuerzo estructural
- Pretensado

Los esfuerzos en un pavimento rígido debido a la rigidez de la losa de hormigón se produce una distribución de las cargas de las ruedas de los vehículos en un área mayor, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante.

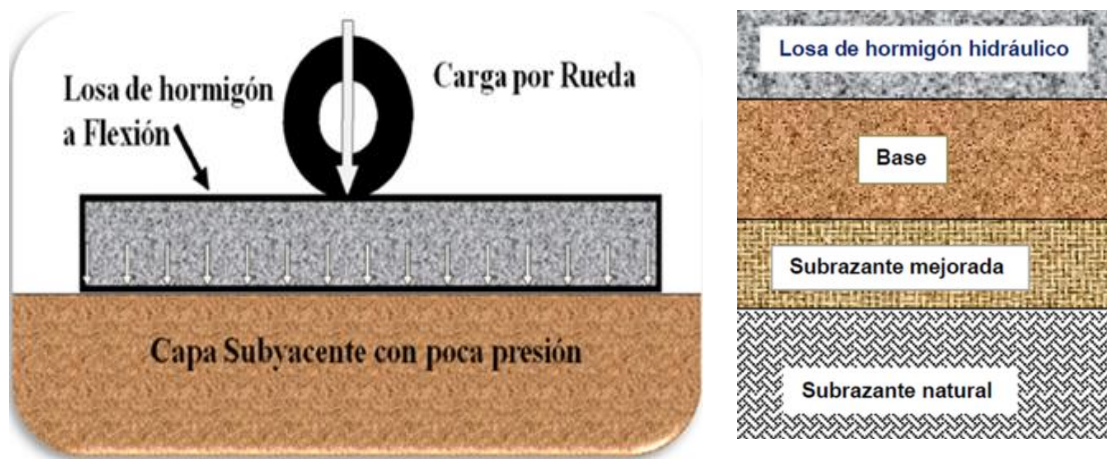


FIGURA 2: ESTRUCTURA Y COMPORTAMIENTO BAJO LA ACCION DE UNA CARGA DE UN PAVIMENTO RIGIDO

Pavimentos Flexibles

Se Denomina pavimento flexible al que está constituido por una carpeta o capa bituminosa, apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, habitualmente de materiales o suelos granulares, denominadas, base y subbase; la primera, situada sobre la segunda. Sin embargo, en función de las características particulares de cada caso, es posible prescindir de cualquiera de estas dos capas.

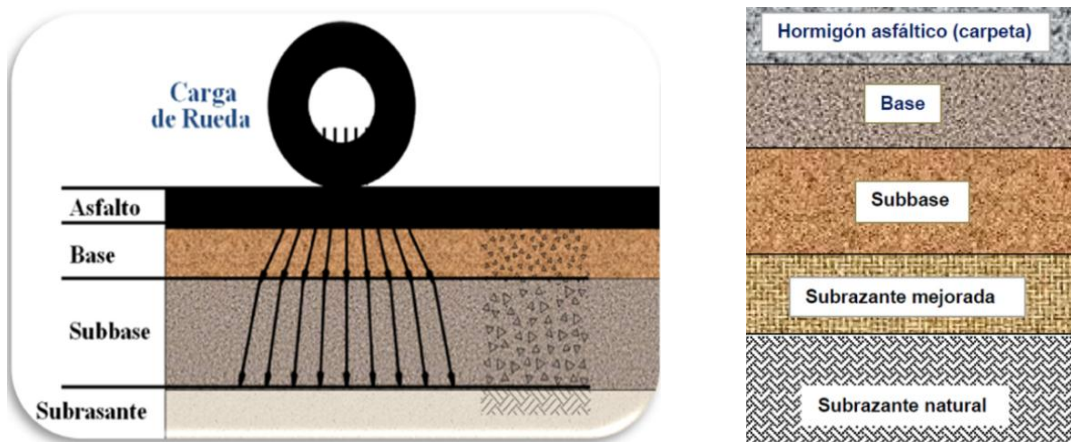


FIGURA 3: ESTRUCTURA Y COMPORTAMIENTO BAJO LA ACCION DE UNA CARGA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

2.3.CARACTERIZACION DE LA SOLICITACION PARA EL ANALISIS ESTRUCTURAL DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

La caracterización de los pavimentos depende de lo siguiente:

1. NATURALEZA CÍCLICA DE LAS CARGAS QUE ACTÚAN EN UN PAVIMENTO

Los materiales que constituyen los pavimentos, incluyendo las terracerías y el terreno de cimentación, se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que se transmiten por el tránsito vehicular. El patrón de esfuerzos inducidos a una estructura de pavimento como resultado del tráfico de vehículos es muy complejo. Un elemento de pavimento está sujeto a pulsos de carga que involucran componentes de esfuerzos normales y cortantes.

La FIGURA 4 muestra el esquema de una sección longitudinal de las capas de un pavimento, sobre la cual una carga se mueve a velocidad constante.

El estado de esfuerzos experimentado por el punto P -debido a la carga en el punto A- puede observarse en la FIG. 4(a); en este punto actúan tanto esfuerzos normales como

esfuerzos cortantes. Cuando la carga se mueve al punto B, los esfuerzos cortantes son nulos y únicamente actúan los esfuerzos normales, como se presenta en la FIG. 4(b); en este punto se tiene un estado triaxial de esfuerzos, debido a que se presentan sólo esfuerzos normales. La dirección de los esfuerzos cortantes originados en el punto C es contraria a la dirección de los esfuerzos originados en el punto A, como se muestra en la Figura 4(c).

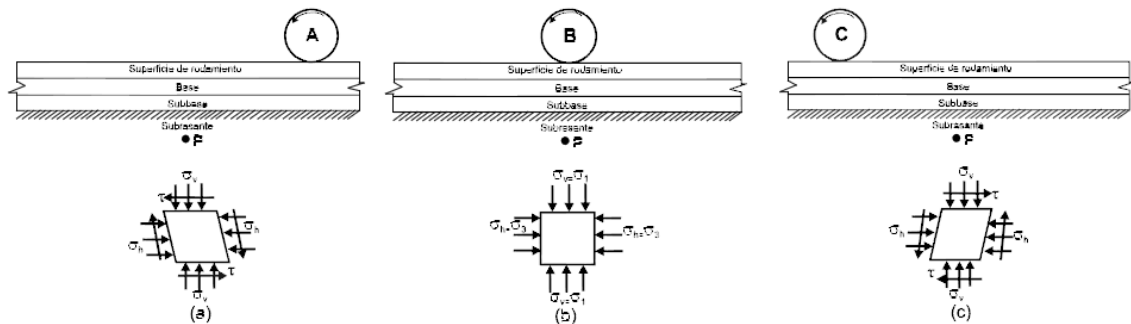


FIGURA 4: ESTADO DE ESFUERZOS EN LA SUBRASANTE

En laboratorio se realizan pruebas triaxiales simulando la condición B tratando de simular las condiciones más desfavorables. Durante las pruebas debe aplicarse una presión de confinamiento que varíe con el esfuerzo desviador; sin embargo es difícil simular en laboratorio este cambio, por lo que la presión de confinamiento se mantiene constante y el esfuerzo desviador es el que se aplica en forma repetida.

2. MEDICIONES DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN CASOS REALES

Dada la forma tradicional de estructuración de los materiales que conforman el pavimento, la deformabilidad suele crecer hacia abajo. La deformabilidad interesa sobre todo a niveles profundos, pues es relativamente fácil que las capas superiores tengan niveles de deformación tolerables aún para los altos esfuerzos que en ellas actúan.

En pavimentos, las deformaciones interesan desde dos puntos de vista: por un lado, las deformaciones excesivas están asociadas a estados de falla y por otro porque es sabido que un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho (Rico A., Del Castillo H., 1992).

Con el fin de tomar en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman una estructura de pavimento, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales, se han realizado en el mundo varios trabajos experimentales, tanto en modelos a escala natural como en muestras de material probadas en el laboratorio, obteniéndose valiosa información sobre el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales.

Brown (1996), reporta gráficas de esfuerzos y deformaciones obtenidas mediante la instrumentación de una estructura de pavimento sujeta a la aplicación de carga repetida por medio del paso de un tracto camión. Las FIG. 5 (a) y 5(b) corresponden a las mediciones antes mencionadas en un punto ubicado a 35 cm de profundidad con respecto a la superficie de rodamiento.

Se puede apreciar que la carga que transmiten los vehículos es en forma de pulsos, cuya magnitud depende de la presión de inflado de las llantas y de la carga por eje; además, la duración de aplicación del pulso depende de la velocidad y del nivel de tránsito diario.

También se observa que la máxima deformación registrada corresponde al valor del esfuerzo máximo.

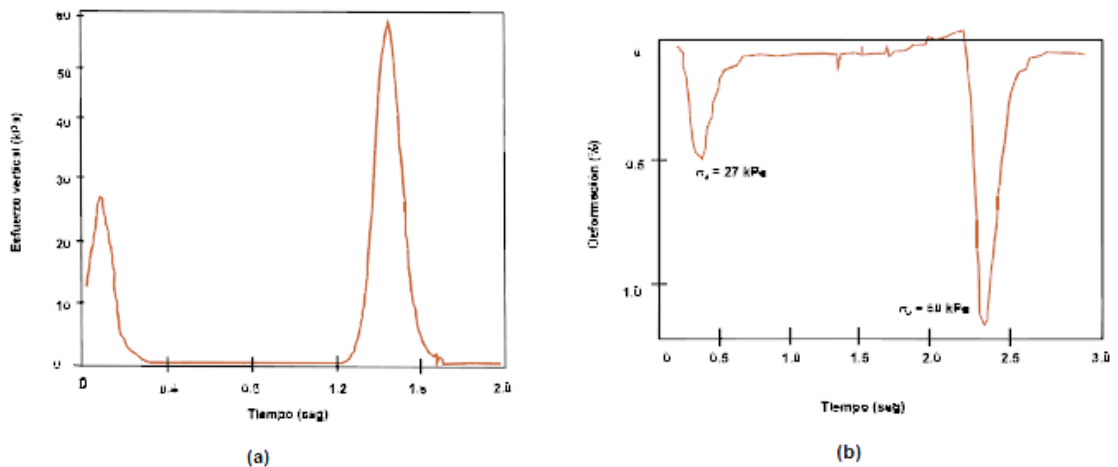


FIGURA 5: VARIACION TIPICA DE LA DEFORMACION VERTICAL RESILIENTE EN UN PAVIMENTO CON CARPETA ASFALTICA

3. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL VEHÍCULO EN EL TIEMPO DE APLICACIÓN DE CARGA

Con base en los puntos señalados anteriormente, se ha supuesto que los esfuerzos aplicados por una llanta en movimiento se aproximan a una forma senoidal, cuya duración depende de la velocidad del vehículo y de la profundidad del punto al que se está haciendo referencia.

Barksdale (1971) investigó sobre los tiempos de pulsación a diferentes profundidades bajo la superficie del pavimento, así como también a diferentes velocidades. En estos resultados se observa cómo a mayor velocidad del vehículo el tiempo de aplicación de la carga disminuye; también es evidente que simulando el esfuerzo vertical con una onda triangular, los tiempos de aplicación aumentan. También se puede apreciar que el tiempo de duración de la carga aumenta con la profundidad.

4. MECANISMO DE DEFORMACIÓN DE UN MATERIAL SUJETO A CARGA CÍCLICA

De acuerdo con el diseño estructural del pavimento, el tipo y la magnitud de las solicitaciones, repeticiones de carga acumuladas, características asociadas al clima y la localización de las diferentes capas de material; el comportamiento esfuerzo-deformación de un suelo puede ser de dos tipos: resiliente y plástico.

Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suelen denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora. Bajo carga móvil y repetida, la deformación plástica tiende a hacerse acumulativa y puede llegar a alcanzar valores inadmisibles. Paradójicamente, este proceso suele ir acompañado de una “densificación” de los materiales, de manera que el pavimento fallado puede ser más resistente que el original.

La deformación elástica repetida preocupa sobre todo en materiales con resistencia a la tensión-carpetas asfálticas o capas estabilizadas colocados en la parte superior de la estructura, en los que se puede llegar a generar una falla de agrietamiento por fatiga si el número de repeticiones es importante y los materiales son susceptibles a este efecto.

La importancia que la deformación tiene en los pavimentos es debida a que en los métodos de diseño actuales la deformabilidad es el punto básico a considerar y, de hecho, la mayoría de ellos se centran en mantenerla en límites razonables.

2.4.DEFLEXION DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

La deflexión de un pavimento se define como el valor que representa la respuesta estructural ante la aplicación de una carga ante la aplicación de una carga vertical externa. También se define como el desplazamiento vertical. También se define como el desplazamiento vertical del paquete estructural de un pavimento ante la aplicación de una carga; generalmente la carga es producida por el tránsito vehicular ver FIG. 6.

Cuando se aplica una carga en la superficie, no solo se desplaza el punto bajo esta, produciendo una deflexión máxima, sino que se desplaza una zona alrededor del eje de aplicación de la carga, que se denomina cuenco de deflexión.



FIGURA 6: ESQUEMA DE UN CUENCO DE DEFLEXION

La deflexión permite ser correlacionada con la capacidad estructural de un pavimento, de manera que, en un modelo estructural, si la deflexión es alta, la capacidad estructural del modelo de pavimento es débil o deficiente y lo contrario, si la deflexión es baja quiere decir que el modelo estructural del pavimento tiene buena capacidad estructural.

Para determinar los índices que caracterizan un cuenco de deflexión se tiene en cuenta la deflexión del modelo estructural medido en los siguientes puntos: en el eje de carga del sistema D_0 , a 30 cm del eje de carga D_1 , a 60 cm del eje de carga D_2 y a 90 cm del eje de carga D_3 , tal como se muestra en la FIG. 7.

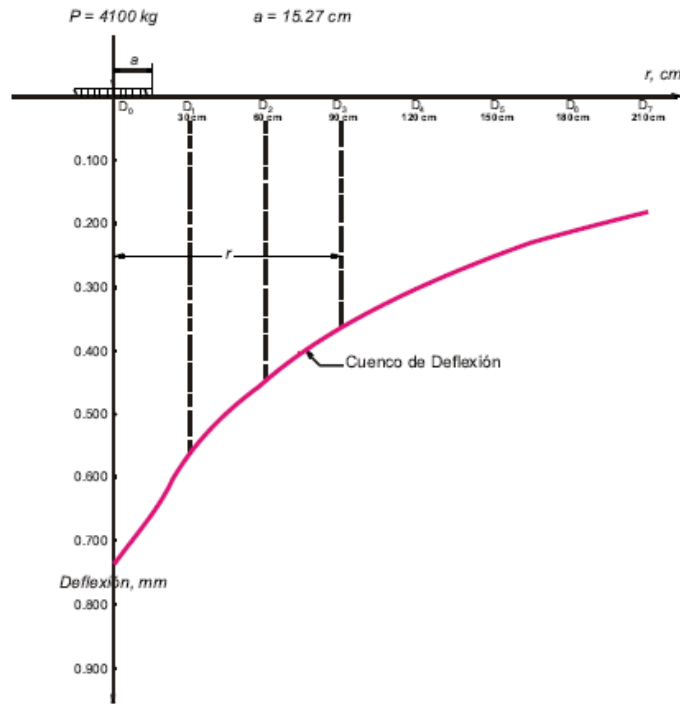


FIGURA 7: CUENCO DE DEFLEXION DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

2.5.EVALUACION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

La evaluación técnica del estado del pavimento, tanto desde el punto de vista del nivel de servicio que otorga al usuario, como de la capacidad de resistir las solicitaciones de cargas durante un periodo de su vida útil, es el paso fundamental para asignar las acciones de conservación más adecuadas que deben ser aplicadas en el pavimento a evaluar. El diagnóstico de las condiciones del pavimento comprende básicamente una evaluación del estado funcional del pavimento y una evaluación de las condiciones estructurales de este.

Evaluación Funcional

La evaluación funcional del pavimento, tiene por objeto el reconocimiento de aquellas deficiencias que se relacionan principalmente con la calidad de la superficie

y el estado general de las condiciones del pavimento, considerando todos aquellos factores que afectan negativamente a la serviciabilidad, seguridad y costos del usuario. Entre este tipo de deficiencias se encuentran: Rugosidad, Fallas superficiales, Pérdida de fricción.

Evaluación Estructural

La evaluación estructural del pavimento, tiene por objeto la cuantificación de la capacidad estructural remanente del pavimento. La falta de capacidad estructural de un pavimento genera en este un deterioro progresivo que se manifiesta en niveles excesivos de agrietamientos y deformaciones, no recuperables a través de la simple aplicación de acciones de conservación preventivas.

2.5.1. METODOS DE EVALUACION

Se clasifican de la siguiente manera:

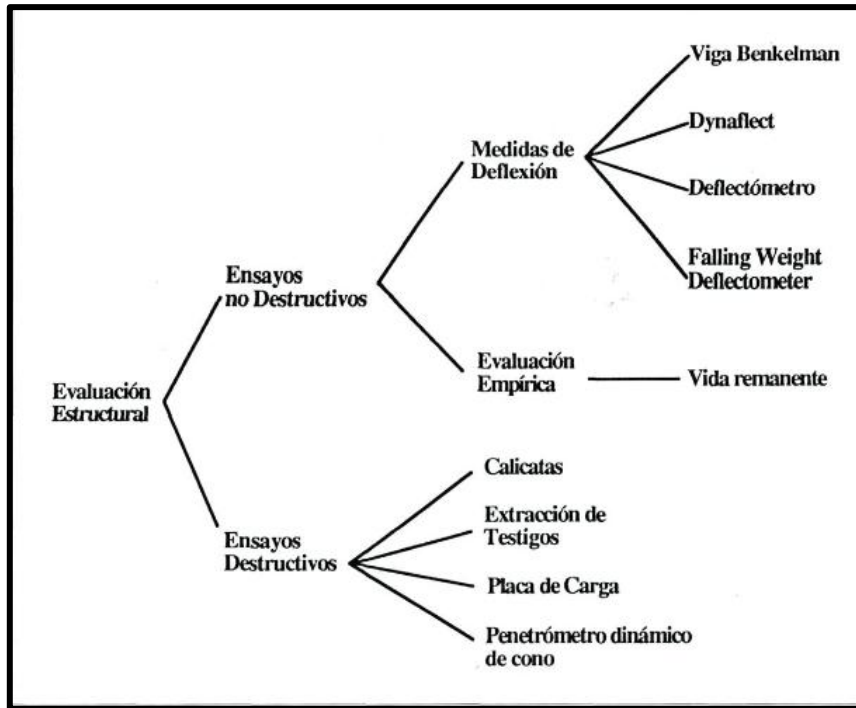


FIGURA 8: METODOS DE EVALUACION

2.5.1.1.METODOS DE EVALUACION DIRECTA

Los métodos de evaluación directa o métodos destructivos, requiere alterar el pavimento existente en algún punto. Entre los ensayos destructivos más utilizados para la evaluación de la capacidad de soporte de la estructura existente, se encuentran:

- a) Excavación de calicatas para determinar propiedades de los materiales de capas: Este procedimiento corresponde al procedimiento tradicional de recolectar información de diseño y tiene como objetivo la determinación de distintas propiedades de los materiales de las capas que conforman el pavimento, para el diseño y/o evaluación estructural. Entre los parámetros a considerar, se encuentran: espesores de capas, CBR de las capas granulares, clasificación, densidades y humedades. Como complemento de este procedimiento, se debe realizar una inspección visual de la superficie, de modo de detectar posibles fallas (en especial grietas) que puedan determinar un menor aporte estructural de las capas de rodado.
- b) Extracción de testigos: Mediante una extractora de testigos, se obtiene una probeta cilíndrica de las capas superficiales del pavimento. En general solo es aplicable a la extracción de materiales de capas de asfalto. Permite medir los espesores y propiedades mecánicas de resistencia de capas cementadas.
- c) Placa de carga: El ensayo de placa de carga sirve para la evaluación de la capacidad portante del material de subrasante, bases, y en algunos casos, del pavimento completo utilizando placas de diámetros relativamente grandes. De este ensayo se determina un módulo de reacción (k). Para aplicar este método en pavimentos existentes, se requiere efectuar calicatas de gran superficie, lo cual resulta poco práctico y costoso. Este ensayo ha quedado paulatinamente en desuso.

- d) **Penetrómetro Dinámico de Cono:** El Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) es un dispositivo que permite realizar de un modo expedito, una auscultación in-situ de las capas de suelo de la subrasante y bases granulares. El principio se basa en la acción de una masa dinámica que cae desde una altura preestablecida, lo que produce la penetración de una sonda en forma de cono. Como resultado del ensayo, se encuentra la penetración de la sonda para un determinado número de golpes (PR), el cual está relacionado con las propiedades de CBR.

2.5.1.2.METODOS DE EVALUACION INDIRECTOS

Los métodos de evaluación indirectos o métodos no destructivos se denominan así, debido a que permiten estudiar la capacidad estructural existente de un pavimento sin necesidad de intervenir este en ningún punto. Entre los métodos no destructivos, se reconocen dos clases:

Medidas de Deflexión y Evaluaciones Empíricas

- a) **Medidas de Deflexión:** Estos métodos se basan en producir deformaciones elásticas o deflexiones en el pavimento mediante dispositivos especiales, los cuales actúan bajo una sollicitación estática o dinámica. Estas deflexiones desaparecen una vez que deja de actuar el dispositivo de medición. Existen varios equipos capaces de medir deflexiones, destacándose entre los más importantes los siguientes:

- i) **Viga Benkelman:** Es el dispositivo más antiguo desarrollado, el cual ha sido tradicionalmente usado para medir deflexiones. Consiste en una estructura con tres puntos de apoyo, de los cuales dos se apoyan en el pavimento en forma de viga simple y un tercero que pivotea en torno a esta bajo la acción de una carga normalizada, con lo cual se registra la deformación relativa entre estos puntos. Este dispositivo tiene la importancia de que es utilizado como el parámetro base para la evaluación estructural de varias metodologías.

ii) Deflectómetro: Consiste en utilizar una viga de deflexión similar a la Viga Benkelman, pero montada en el chasis de un vehículo especialmente adaptado para tales fines. Los deflectómetros más conocidos, son el Lacroix del LCPC (Francia) y una versión modificada por el TRRL (Inglaterra), y el desarrollado en California. La ventaja de este equipo respecto de la viga Benkelman, es que permite realizar las mediciones en forma continua, pudiendo auscultar un número mayor de kilómetros al día. Además, esta correlacionado con la viga Benkelman, por lo cual los valores entregados son fácilmente convertibles a esta última, de acuerdo al método del TRRL.

iii) Dynaflect: Este dispositivo desarrollado y usado en los Estados Unidos, opera bajo el principio de fuerzas vibratorias, la cual es aplicada en el pavimento por medio de dos pequeñas ruedas metálicas. La magnitud de estas deformaciones, son captadas por medio de cinco geófonos colocados en el centro del eje de las dos ruedas y espaciados a intervalos de 30 cm. desde el punto de aplicación. La ventaja respecto a los anteriores métodos, es que puede registrar además de la deflexión máxima, deflexiones en otros puntos alejados, permitiendo estimar por retroanálisis las características estructurales de las capas del pavimento, especialmente el suelo de fundación. Estas mediciones pueden ser correlacionadas además con las medidas por otros equipos. Este tipo de equipos ha quedado paulatinamente en desuso debido al extensivo empleo del Falling Weight Deflectometer.

iv) Falling Weight Deflectometer (FWD): El principio de operación es similar al Dynaflect, con la diferencia de que la sollicitación se produce mediante el impacto producido por la caída libre de un peso sobre unos mecanismos con amortiguadores, los que se apoyan en una placa de goma sobre el pavimento. También en este caso, las vibraciones son captadas por medio de sensores sísmicos ubicados a distintas distancias del punto de aplicación. Esto hace posible generar un cuenco de deflexiones a distintas distancias, las cuales son

parámetros de evaluación estructural para algunos métodos de diseño, en particular los métodos AASHTO y Shell. Las deflexiones medidas con un FWD pueden ser incorporadas en cualquier modelo mecanicista para la determinación de los espesores de capas de refuerzo. El FWD permite medir además la deflexión relativa entre juntas de una losa de hormigón.

b) Evaluaciones Empíricas (Vida Remanente): Este método de evaluación no constituye en sí un ensayo, corresponde más bien a una evaluación la cual está basada en relacionar directamente la pérdida de capacidad estructural del pavimento con las solicitaciones de tránsito reales acumuladas. Para estimar esta vida remanente se deben determinar, el tránsito solicitante que ha soportado el pavimento desde la última puesta en servicio a la fecha, y el tránsito total que produce la falla total del pavimento (estimado según el método AASHTO para una serviciabilidad final de 1.5).

Este método de evaluación, no es recomendado por la incertidumbre de la predicción del tránsito acumulado, y porque no considera el efecto del agrietamiento existente, lo cual puede significar una vida remanente bastante menor a la que indicaría este método.

2.6. CUENCO DE DEFLEXIONES

El principio de medida de un Deflectómetro, para la obtención del cuenco de deflexión, es relativamente sencillo y conocido por todos: se aplica una carga sobre el pavimento se mide la deformación vertical de la superficie (deflexión) bajo el punto de aplicación de la carga y a unas distancias determinadas del mismo (habitualmente en seis u ocho puntos más, dependiendo del equipo y de las características del trabajo). El conjunto de dichas deflexiones registradas es lo que se denomina cuenco de deflexión.

Aparentemente, lo que se registra es la deformación del pavimento (o de forma más precisa, de su superficie) en el momento de la aplicación de la carga. Existe la tendencia a definir el cuenco de deflexión como una respuesta ante la aplicación de una carga estática, como si el impacto provocase una deformación instantánea que es registrada por los sensores como una fotografía. Dicho de otro modo, cuando representamos el cuenco de forma gráfica, podemos pensar que dicha deformación es la que experimenta el pavimento bajo la aplicación de una carga permanente en el tiempo.

2.7.MODULO RESILIENTE

Cuando un vehículo circula sobre un pavimento sus ruedas transmiten cargas que generan al interior de la estructura de ese pavimento y el suelo de fundación, un estado de esfuerzos que a su vez induce un estado de deformaciones. Si el material de la capa se supone linealmente elástico, isotrópico y homogéneo, ambos estados se consideran relacionados entre sí a través del Módulo de Elasticidad y la Razón de Poisson propios del material. Sin embargo la respuesta real de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos y suelo de fundación, muestra que bajo pulsos de carga dinámicos como los inducidos por las ruedas de los vehículos, solo parte de la deformación total generada se recupera al cesar la sollicitación aplicada. Esto implica que en estricto rigor este tipo de materiales no presenta un comportamiento elástico. En consideración a este hecho se introduce el concepto de Módulo Resiliente, que se define como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables [AASHTO, 1993].

FACTORES QUE AFECTAN LA MAGNITUD DEL MÓDULO RESILIENTE

El módulo resiliente en pavimentos no es una magnitud constante, y de acuerdo a los antecedentes recopilados, depende principalmente del estado de esfuerzos solicitante y de las condiciones físicas en que se encuentre el pavimento al momento del ensayo.

a) Estado de esfuerzos solicitante.

El estado de esfuerzos se encuentra compuesto por una presión de confinamiento (σ_3) y un esfuerzo desviador dinámico (σ_d). De acuerdo a los antecedentes recopilados, ambos componentes influyen sobre la magnitud del módulo resiliente. En el caso de la presión de confinamiento existe una relación directa entre la magnitud del módulo resiliente y la intensidad de la presión de confinamiento, es decir, aumentos de la presión de confinamiento inducen aumentos en la magnitud del módulo resiliente y una disminución de la presión de confinamiento induce una disminución en la magnitud del módulo resiliente. Esta tendencia es independiente del tipo de suelo de que se trate. A diferencia de lo anterior en el caso del esfuerzo desviador la tendencia depende del pavimento. La información recopilada indica que la magnitud del módulo se incrementa a medida que el número de aplicaciones aumenta, tendiendo a permanecer constante a partir de las 1000 repeticiones. Este fenómeno fue considerado en el diseño del procedimiento de ensayo, el cual considera un ciclo de acondicionamiento de la muestra que comprende la aplicación de 1000 repeticiones, de un estado de esfuerzos determinado.

b) Condiciones físicas del suelo.

De acuerdo a los antecedentes recopilados la magnitud del módulo resiliente depende en forma significativa de las condiciones físicas en que se encuentre el pavimento al momento del ensayo. La magnitud del módulo resiliente se relaciona en forma directa con la densidad y en forma inversa con el contenido de humedad.

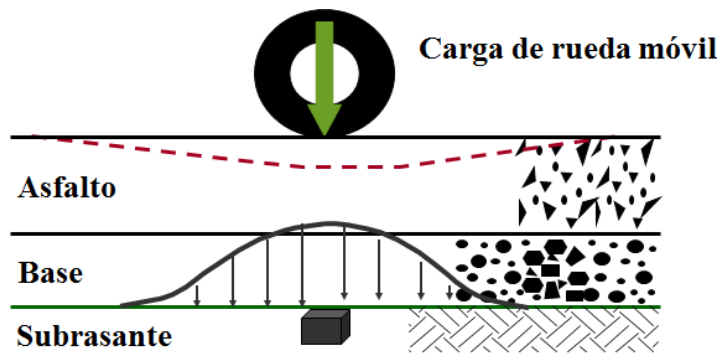


FIGURA 9: RESPUESTA ANTE UNA CARGA DINAMICA

SOLICITACIONES DE CARGA EN UN PAVIMENTO

El tránsito tiene una gran influencia en la aplicación de las cargas en un pavimento y su caracterización es bastante compleja debido no solo a la variabilidad de los distintos vehículos existentes, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito.

Para caracterizar las solicitaciones producidas por el tránsito a un pavimento se pueden estudiar independientemente los siguientes aspectos:

- Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (carga por eje, número de ejes que circulan, y número de repeticiones de carga).
- Forma geométrica de cada solicitación sobre el pavimento (área de contacto y reparto de presiones sobre la misma).
- Velocidad de los vehículos y tiempo de solicitación en un punto.
- Estados de esfuerzos que producen las cargas, en función de su magnitud y tipología (verticales, tangenciales, fenómenos de impacto, etc.).
- Características de las capas del firme.

Las cargas de los vehículos al pavimento se transmiten a través de las ruedas, en los métodos de diseño mecanicistas es necesario conocer el área de contacto de la llanta con el pavimento, asumiendo que la presión de contacto depende de la presión de inflado del neumático, como se indica en la FIG. 9, la presión de contacto es más grande que la presión de la llanta, para presiones bajas de la llanta, debido a que la pared de la misma está en compresión y la suma de las fuerzas verticales de la pared y presión de la llanta, deben ser iguales a la fuerza debido a la presión de contacto; la presión de contacto es más pequeña que la presión de la llanta, para presiones altas de las llantas, debido a que la pared de la llanta está en tensión. Sin embargo, en el diseño de pavimentos, la presión de contacto generalmente se asume igual a la presión de la llanta, debido a que los ejes de carga pesados tienen presiones altas y efectos más destructivos en el pavimento, utilizar la presión de la llanta como presión de contacto, es estar por el lado de la seguridad. (Huang, 1993).

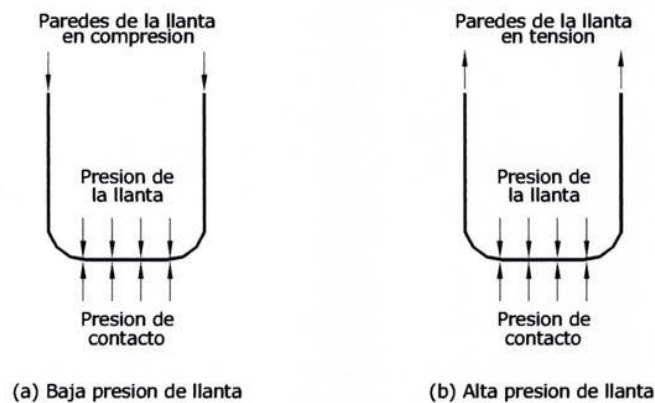


FIGURA 10: RELACION ENTRE LA PRESION DE CONTACTO Y LA PRESION DE LA LLANTA

2.8.MODELO DE HOGG PARA LA OBTENCION DEL MODULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE

El procedimiento con el modelo de HOGG usa la deflexión en el centro de la carga y una de las deflexiones adicionales fuera del punto inicial de aplicación de carga.

HOGG mostró que la distancia radial donde la deflexión es aproximadamente la mitad de la deflexión bajo el punto inicial de carga, era eficaz para eliminar la tendencia de valoración o error estadístico de los parámetros.

Wiseman (2) describió la implementación del modelo de HOGG señalando tres casos. Uno es para una fundación infinita elástica, y los otros dos casos son para un estrato finito elástico con un espesor efectivo que se asume aproximadamente igual a 10 veces la longitud característica l . Los dos casos de espesor finito corresponden a coeficientes de Poisson fijados en 0.4 y 0.5, respectivamente. La Tabla 1 muestra los valores establecidos para las constantes usadas para los tres casos del modelo de HOGG.

Ecuación	CASOS		I	II	III
	Profundidad de estrato rígido	h/l_0	10	10	Infinito
	Coefficiente de Poisson	μ_0	0.50	0.40	Todos
1	Factor de Influencia	l	0.1614	0.1689	0.1925
2	Valor de Δ_r/Δ_0		> 0.70	> 0.426	Todos
	$r_{50}=f(\Delta_r/\Delta_0)$	α	0.592	0.548	0.584
		β	2.460	2.629	3.115
		B	0	0	0
	Valor de Δ_r/Δ_0		< 0.70	< 0.426	
	$r_{50}=f(\Delta_r/\Delta_0)$	α	0.219	0.2004	
β		371.1	2283.4		
B		2	3		
3	$l=f(r_{50}, \alpha)$	γ_0	0.620	0.602	0.525
		m	0.183	0.192	0.180
4	$S_p/S = f(a/l)$	\bar{m}	0.52	0.48	0.44

TABLA 1: COEFICIENTES PARA EL MODELO DE HOGG

Para el desarrollo de la ecuación de correlación entre el producto D0xR50 y el módulo de la subrasante E0, se utilizaron datos obtenidos en ensayos reales de

medición de cuencos de deflexiones para un rango amplio de suelos, empleando siempre la carga de un eje estándar, para los cuales se obtuvo el módulo elástico del substrato mediante la aplicación rigurosa del modelo de HOGG. Las corridas del programa de cómputo se realizaron considerando el Caso II de la metodología, es decir, para una profundidad del estrato rocoso igual a $h/10=10$ y un coeficiente de Poisson $\mu= 0.40$. La selección del Caso II para el análisis de los datos de deflexiones se realizó considerando una serie de tipo de muestras y con la que se ha obtenido resultados que siempre han podido ser correlacionados con las condiciones particulares de los suelos en el campo.

Además, es importante señalar que esta consideración concuerda con los resultados obtenidos en los últimos 15 años en el proyecto de investigación de largo alcance sobre performance de pavimentos que se lleva a cabo en EE.UU. desde 1987 (Long Term Pavement Performance) (4); de acuerdo a dicha experiencia, se ha encontrado que el Caso II del modelo de HOGG es el que proporciona resultados razonablemente estables para una amplia variedad de tipos de pavimentos y ubicaciones, habiéndose encontrado una alta correlación de estos con los módulos de subrasante determinados por retrocálculo con el programa MODCOMP4, el cual permite la caracterización elástica no-lineal de los suelos y materiales del pavimento.

La ecuación de correlación fue obtenida mediante el análisis de 2135 pares de datos ($D_0 \times R_{50}$, E_0), en donde $D_0 \times R_{50}$ varía entre 324 y 6778x10-1cmxcm, y E_0 varía entre 260 y 5236 kg/cm². Mediante un análisis de regresión se encontró que la tendencia exponencial demostraba mejor ajuste, encontrándose un coeficiente de determinación de $R^2=0.992$ para la siguiente expresión:

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

ECUACION 1

La Figura 11 presenta la correlación gráfica establecida, en donde se observa la escasa dispersión que presentan los parámetros analizados, lo que demuestra una casi perfecta correlación que concuerda plenamente con los conceptos descubiertos por Leger y Autret.

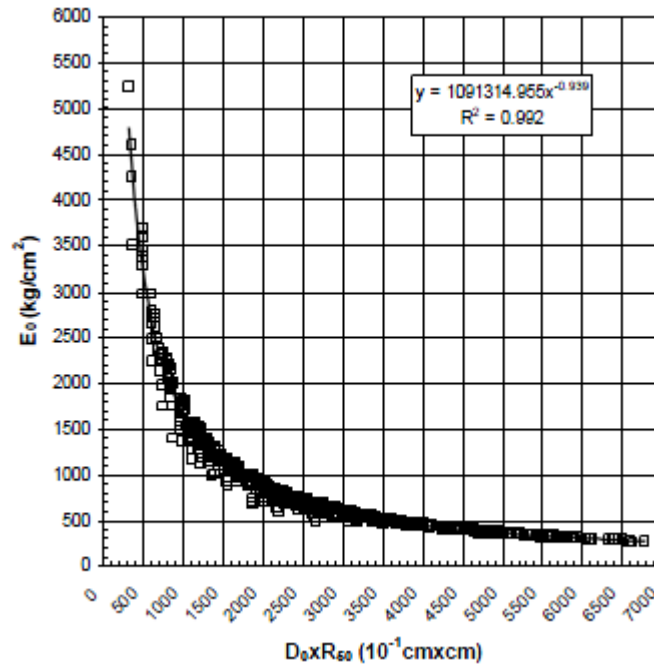


FIGURA 11: RELACION ($D_o \times R_{50}$) VERSUS E_o

2.9.METODOLOGIA PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE

2.9.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La automatización de la viga Benkelman permite realizar los ensayos de manera más rápida y eficiente sin olvidar que se trata de un equipo demasiado sensible, las medidas son tomadas de manera continua a distancias de 0 cm, 25 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 75 cm y >500 cm, lo cual permite una gráfica más precisa de la recuperación del pavimento.

2.9.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La medición de deflexiones se realizara a través de la viga Benkelman siguiendo un procedimiento de campo entre el equipo para desarrollar el ensayo se encuentran:

- Deflectómetro Viga Benkelman
- Extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0,01 mm.
- Camión cargado, con eje trasero de 18000 libras igualmente distribuidas en un par de llantas dobles infladas a una presión de 75 psi.
- Vehículo auxiliar para transportar al personal y equipo.
- Accesorios de medición y otros (cinta métrica, regla marcada con las distancias a medir, plomada, destornillador, alicates, hojas de campo, lápices, señales y chalecos de seguridad, varilla de metal de 2 m para el camión.)

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

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

2.9.3. PROCEDIMIENTO DE CAMPO: LEVANTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

2.9.3.1.MEDICIÓN DE DEFLEXIONES

a) Preparación del ensayo

El camión se cargará con piedras manzana, y se pesará en báscula contrastada hasta tener un peso por el eje trasero de $8,2 \pm 0,2t$. Se comprobará la carga al comienzo del ensayo y, para series de ensayos, al comienzo y al final de la jornada de trabajo. Las ruedas gemelas, bajo las que se realizaran las medidas, tendrán un peso de $4,1 \pm 0,1t$.

Se anotará la presión de inflado con la que se ha obtenido la huella correcta. Esta presión es la que debe mantenerse constante con oscilaciones máximas de $\pm 0,01$ durante todas las series de ensayos a realizar.

Se montará la viga Benkelman, comenzando por la unión de los tres tramos de la palanca de medida. Luego se coloca el nivel y finalmente el comparador. Se comprobará el correcto funcionamiento de todo el conjunto. La viga Benkelman se sitúa en el punto de medida, de modo que la punta del palpador quede situada sobre dicho punto y la palanca alineada con una paralela al eje de la calzada o con la dirección elegida para el movimiento del vehículo de carga. Se protegerá la viga de la insolación directa.

Se procederá a buscar un orificio de 20 a 50mm de profundidad con diámetro suficiente para la introducción del bulbo del termómetro y de esta manera realizar la lectura de la temperatura.

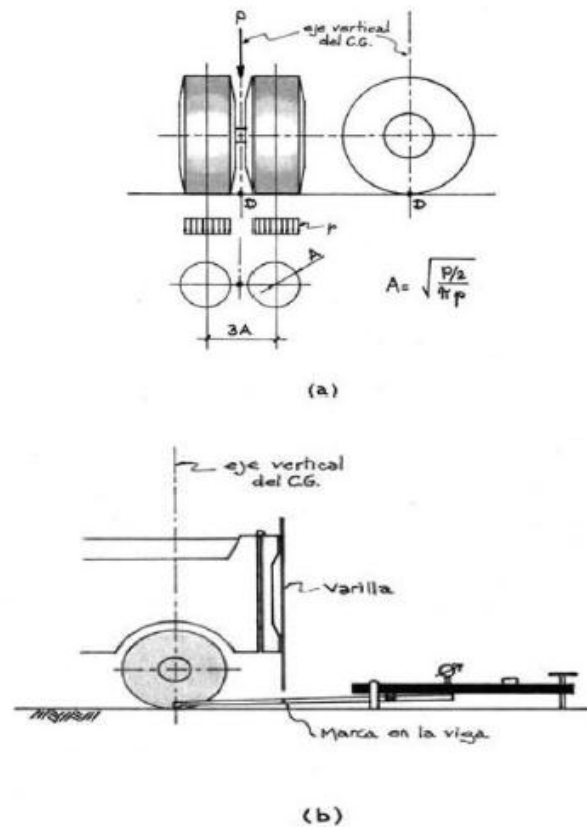


FIGURA 12: CONFIGURACION GEOMETRICA DEL SISTEMA DE CARGA

b) Procedimientos operativos

Una vez elegida la situación del punto a ensayar y realizar los procesos preparatorios, se sitúa el vehículo con el centro de las ruedas a 0.30m del punto a ensayar, hacia el operador, de manera que el eje del vehículo quede en la dirección elegida de movimiento, generalmente paralela al borde de la calzada.

Se coloca la viga Benkelman en el punto de medida.

Se anotará la lectura inicial L_0 del comparador, con la carga y la viga en la posición de ensayo, cuando la aguja del comparador no varíe más de 0.01mm en 5seg.

El operador deberá avisar al conductor para que este desplace el camión lentamente, con velocidad de 1 cm/s, hacia adelante, de forma continuada hasta que el eje de las ruedas (o centro de carga) se encuentre a 2.50m del punto de medida.

Se anotara la lectura máxima L_m del comparador, que se produce generalmente en las proximidades del paso del eje de las ruedas (o centro de la carga) sobre la vertical del punto de medida, y la lectura L_1 del comparador después de transcurridos 5seg de la aplicación de la carga en el punto de parada indicado anteriormente.

Se desplaza nuevamente el camión hasta que el centro de carga se encuentre a 25 cm del punto de medida, se para y se anota la lectura L_2 después de 5seg de aplicación de la carga.

De nuevo se desplaza el camión hasta que el centro de la carga se encuentre a 30 cm del punto de medida, se para y se anota la lectura L_3 después de 5 seg de aplicación de la carga.

De nuevo se desplaza el camión hasta que el centro de la carga se encuentre a 40 cm del punto de medida, se para y se anota la lectura L_4 después de 5 seg de aplicación de la carga.

De nuevo se desplaza el camión hasta que el centro de la carga se encuentre a 50 cm del punto de medida, se para y se anota la lectura L_5 después de 5 seg de aplicación de la carga.

Se avisa al conductor para que desplace el vehículo hasta que el centro de carga se aleje más de 500 cm del punto de medida.

Se anota la lectura final (L_f) después de parado el camión, cuando la variación de la lectura del comparador sea inferior a 0.01mm en 5seg.

Se anota la temperatura del pavimento, retirando el medidor de temperatura del orificio, y la temperatura del aire.

Se realizan estos ensayos cada 80 m a lo largo de la vía, en cada carril.

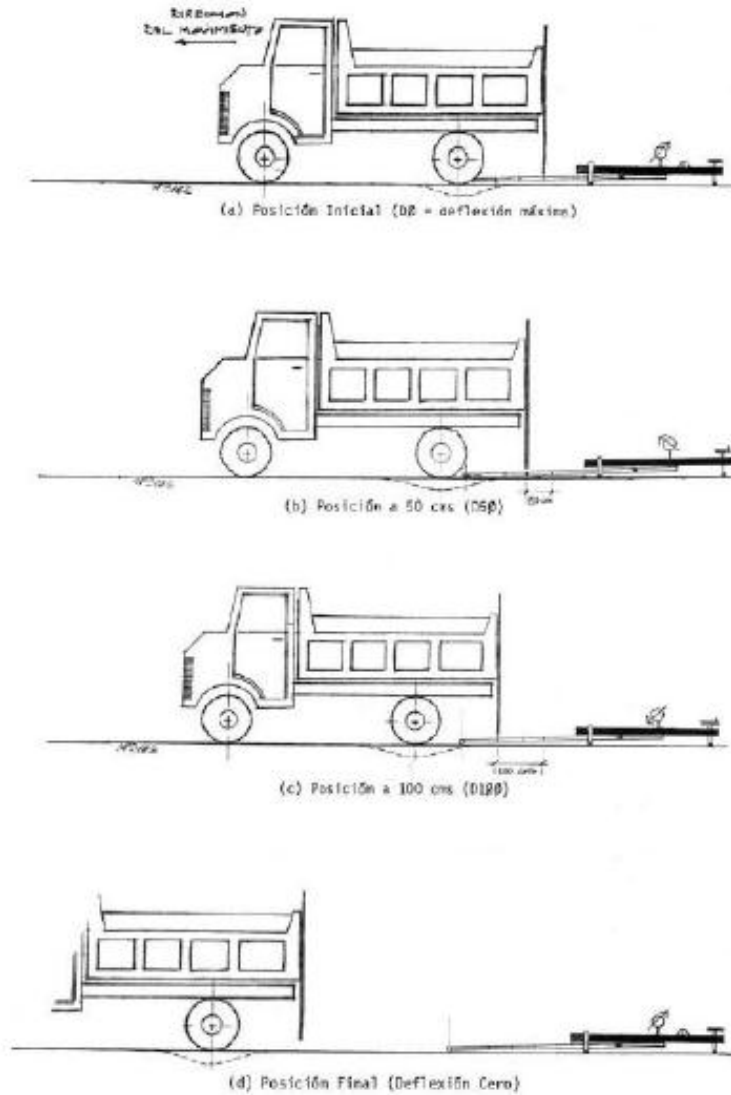


FIGURA 13: ESQUEMA DEL PROCESO DE MEDICION

2.9.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DEFLEXIONES

Cuando se realiza un programa de auscultación de una vía, se busca evaluar la capacidad estructural del pavimento, y poder establecer programas de rehabilitación. Dos parámetros utilizados para determinar el comportamiento estructural de un pavimento son la deflexión admisible y la deflexión característica, que involucra conceptos estadísticos como promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.

2.9.4.1.CALCULO DE DEFLEXIONES

El procedimiento para el cálculo de deflexiones es simple. Para el caso de la deflexión máxima, se debe calcular la diferencia entre la lectura inicial y la lectura final.

$$D_{max} = (L_i - L_f) * 2$$

ECUACION 2

Y para encontrar la deflexión a una determinada distancia, se deberá realizar la diferencia entre la lectura a una distancia X y la lectura final.

$$D_x = (L_x - L_f) * 2$$

ECUACION 3

La diferencia se multiplica por 2, debido a que la relación de brazos de la viga Benkelman es empleada es de 1:2.

2.9.4.2.CORRECCIÓN POR TEMPERATURA Y ESTACIONALIDAD

Partiendo de la premisa que la temperatura de la capa asfáltica de rodadura influencia en el valor de la deflexión las deflexiones medidas sobre la superficie de un

pavimento asfáltico deben ser corregidas en función a la temperatura media que la capa experimenta durante la ejecución del ensayo la cual varía durante el transcurso del día.

Así mismo la capacidad de deformación de los suelos está influenciada por el grado de saturación que experimentan, por lo que el valor del coeficiente C depende de la naturaleza del suelo subrasante y el periodo característico de la zona. Ver tabla.

Naturaleza del suelo subrasante	Coeficiente de corrección		
	Periodo lluvias	Periodo intermedio	Periodo seco
Suelos arenosos y permeables	1.0	1.0 - 1.1	1.1 - 1.3
Suelos arcillosos e impermeables	1.0	1.3-1.5	1.5 - 1.8

TABLA 2: CORRECCION DE LA DEFLEXION POR CONDICIONES AMBIENTALES

A fin de referir todas las deflexiones a una temperatura standard de 20 °C y a las mismas condiciones ambientales, se emplea la siguiente expresión.

$$FACTOR DE COORRECCION = \frac{C}{(K * (t - 20) * e + 1)}$$

ECUACION 4

Dónde:

C= Coeficiente de corrección por condiciones ambientales.

K= coeficiente igual a 1×10^{-3} (1/cm°C)

t= temperatura del asfalto medida para cada ensayo.

e= espesor de la carpeta asfáltica en cm.

Análisis de la capacidad estructural

2.9.4.3.CALCULO DEL RADIO DE CURVATURA

El método asume que la curvatura que experimenta la superficie del pavimento, durante la aplicación de la carga es de forma parabólica, en un segmento de aproximadamente 25 cm, a partir del punto máxima deflexión.

Para la determinación del radio de dicha curvatura se ha establecido la siguiente expresión empírica:

$$R = \frac{3125}{(D_0 - D_{25})}$$

ECUACION 5

2.9.4.4.DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA

La deflexión característica es un parámetro estadístico empleado para la caracterización representativa de la magnitud de deformación de los pavimentos. Para su determinación es necesario contar con una base de datos de deflexiones máximas, del tramo que se requiere evaluar, y establecer los parámetros estadísticos de dichos datos. Se define con la siguiente expresión empírica:

$$D_c = D_p + t * \sigma$$

ECUACION 6

Dónde:

Do= Deflexión característica.

D_p = deflexión promedio de los valores individuales de D_o corregidos por temperatura y estacionalidad.

σ = desviación estándar

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

Convencionalmente se utiliza un valor de $t=1.645$, lo que equivale a considerar que, solo un 5% del área total del pavimento, tendrá deflexiones mayores a D_c .

El valor medio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (parámetro que nos indica la homogeneidad de los datos) se calcula mediante las ecuaciones:

Deflexión promedio

$$D_p = \frac{\sum d}{n}$$

ECUACION 7

Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d - D)^2}{n - 1}}$$

ECUACION 8

2.9.4.5.DEFLEXIÓN ADMISIBLE

La deflexión admisible es un parámetro definido en función al tráfico de diseño, que establece un límite para la deflexión característica por encima del cual no se garantiza

un comportamiento satisfactorio de la estructura durante el periodo considerado. La expresión analítica que define este parámetro es:

$$D_a = \left(\frac{1.15}{N18} \right)^{1/4}$$

ECUACION 9

Dónde:

Da= deflexión admisible inicial (mm).

N18= número total de ejes equivalentes a 18 k (en millones)

Rango	Medida de calificación
Muy bueno (entre 5,0 y 4,0)	$D_c/\Delta_{adm} < 0,5$
Bueno (entre 4,0 y 3,0)	$0,5 < D_c/\Delta_{adm} < 1,0$
Regular (entre 3,0 y 2,0)	$1,1 < D_c/\Delta_{adm} < 1,4$
Malo (entre 2,0 y 0,0)	$D_c/\Delta_{adm} > 1,4$

TABLA 3: CLASIFICACION DEL ESTADO PAVIMENTOS CON RELACION A LAS DEFLEXIONES

2.9.5. MODULO RESILIENTE

Para la determinación del módulo de elasticidad o módulo resiliente del suelo de subrasante se deberán seguir los siguientes pasos:

- a) De la curva de deflexión medida se selecciona el valor de la deflexión máxima D_0 y una deflexión adicional D_r correspondiente a la distancia radial R que en

la mayoría de los casos se toma la deflexión obtenida a 40 cm debido a que en ese punto se considera una 50 % de la deflexión máxima.

- b) Se calcula la relación D_0/D_r .
- c) Se calcula el valor del Factor de Longitud de Curva R50, empleando la Ecuación 2, la relación D_0/D_r y los coeficientes de la Tabla 1.

$$r_{50} = r * \frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^{1/\beta} - B}{\left[\frac{1}{\alpha} * \left(\frac{D_0}{D_r} - 1\right)\right]^{1/\beta} - B}$$

ECUACION 10

- d) Se calcula el producto $D_0 \times R50$.
- e) Se calcula el módulo resiliente mediante la Ecuación 1.

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

ECUACION 1

2.9.6. ENSAYO DE VALIDACIÓN

El ensayo de validación se realizará a través de la obtención de muestras de la subrasante, dichas muestras serán obtenidas a través de un método destructivo como lo es el de las calicatas de dimensiones 60x60 cm.

Se realizarán dos calitas en los extremos de las bermas de la carretera en la progresiva 022+360 carril derecho y en la progresiva 028+540 carril izquierdo. A través de esas muestras obtendremos las diferentes propiedades de los suelos obteniendo granulometrías, límites y por último la determinación de la relación soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTMD1883 AASHTO T193).

A partir de los resultados obtenidos con los ensayos realizaremos un análisis de los resultados por ambos métodos.

Para este ensayo de validación se usará la siguiente normativa:

- S0302. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (ASTM D422 AASHTO T88)
- S0404. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO EN EL LABORATORIO (CBR DE LABORATORIO) (ASTM D1883 AASHTO T193)

Al considerarse el Módulo de Resiliencia (MR) como una medida de la rigidez del suelo de subrasante, se emplea una ecuación para su cálculo, que la correlaciona con el CBR, recomendada por el MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide):

$$Mr (psi) = 2555 * CBR^{0.64}$$

ECUACION 11

A continuación el cálculo de módulo de resiliencia para diferentes tipos de CBR.

CBR% SUBRASANTE	MÓDULO RESILIENTE SUBRASANTE (MR) (PSI)	MÓDULO RESILIENTE SUBRASANTE (MR) (MPA)	CBR% SUBRASANTE	MÓDULO RESILIENTE SUBRASANTE (MR) (PSI)	MÓDULO RESILIENTE SUBRASANTE (MR) (MPA)
6	8,043.00	55.45	19	16,819.00	115.96
7	8,877.00	61.20	20	17,380.00	119.83
8	9,669.00	66.67	21	17,931.00	123.63
9	10,426.00	71.88	22	18,473.00	127.37
10	11,153.00	76.90	23	19,006.00	131.04
11	11,854.00	81.73	24	19,531.00	134.66
12	12,533.00	86.41	25	20,048.00	138.23
13	13,192.00	90.96	26	20,558.00	141.74
14	13,833.00	95.38	27	21,060.00	145.20
15	14,457.00	99.68	28	21,556.00	148.62
16	15,067.00	103.88	29	22,046.00	152.00
17	15,663.00	107.99	30	22,529.00	155.33
18	16,247.00	112.02			

TABLA 4: MODULO DE RESILENCIA OBTENIDO POR CORRELACION CON CBR

Una vez definido el valor del CBR de diseño, para cada sector de características homogéneas, se clasificará a que categoría de subrasante, según lo siguiente:

Categorías de Subrasante	CBR
S ₀ : Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Subrasante Pobre	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Subrasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Subrasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Subrasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Subrasante Excelente	CBR ≥ 30%

TABLA 5: CATEGORIAS DE SUBRASANTE

CAPITULO III

INGENIERIA DE LA INVESTIGACION

3.1. UBICACIÓN

Los ensayos se realizaran en el tramo Cruce – Túnel Falda la Queñua que tiene su inicio de trayectoria desde el Túnel Falda la Queñua hasta el departamento de Tarija en el cruce de la carretera San Lorenzo Comunidad del Rancho.

3.1.1. PROGRESIVA INICIAL

El ensayo tendrá como progresiva inicial 2+060 en el carril derecho y 31+680 en el carril izquierdo yendo a favor del tráfico para evitar accidentes.

3.1.2. PROGRESIVA FINAL

El ensayo tendrá como progresiva final 31+660 en el carril derecho y 2+040 en el carril izquierdo.

3.1.3. PROGRESIVAS DE LAS MUESTRAS

Las progresivas de las muestras se encuentran cada 80 metros a lo largo del tramo Cruce-Túnel Falda la Queñua.

CARRIL DERECHO

Nº	Progresiva	Nº	Progresiva	Nº	Progresiva	Nº	Progresiva	Nº	Progresiva	Nº	Progresiva
1	002+040	39	005+080	77	008+120	115	011+160	153	014+200	191	017+240
2	002+120	40	005+160	78	008+200	116	011+240	154	014+280	192	017+320
3	002+200	41	005+240	79	008+280	117	011+320	155	014+360	193	017+400
4	002+280	42	005+320	80	008+360	118	011+400	156	014+440	194	017+480
5	002+360	43	005+400	81	008+440	119	011+480	157	014+520	195	017+560
6	002+440	44	005+480	82	008+520	120	011+560	158	014+600	196	017+640
7	002+520	45	005+560	83	008+600	121	011+640	159	014+680	197	017+720
8	002+600	46	005+640	84	008+680	122	011+720	160	014+760	198	017+800
9	002+680	47	005+720	85	008+760	123	011+800	161	014+840	199	017+880
10	002+760	48	005+800	86	008+840	124	011+880	162	014+920	200	017+960
11	002+840	49	005+880	87	008+920	125	011+960	163	015+000	201	018+040
12	002+920	50	005+960	88	009+000	126	012+040	164	015+080	202	018+120
13	003+000	51	006+040	89	009+080	127	012+120	165	015+160	203	018+200
14	003+080	52	006+120	90	009+160	128	012+200	166	015+240	204	018+280
15	003+160	53	006+200	91	009+240	129	012+280	167	015+320	205	018+360
16	003+240	54	006+280	92	009+320	130	012+360	168	015+400	206	018+440
17	003+320	55	006+360	93	009+400	131	012+440	169	015+480	207	018+520
18	003+400	56	006+440	94	009+480	132	012+520	170	015+560	208	018+600
19	003+480	57	006+520	95	009+560	133	012+600	171	015+640	209	018+680
20	003+560	58	006+600	96	009+640	134	012+680	172	015+720	210	018+760
21	003+640	59	006+680	97	009+720	135	012+760	173	015+800	211	018+840
22	003+720	60	006+760	98	009+800	136	012+840	174	015+880	212	018+920
23	003+800	61	006+840	99	009+880	137	012+920	175	015+960	213	019+000
24	003+880	62	006+920	100	009+960	138	013+000	176	016+040	214	019+080
25	003+960	63	007+000	101	010+040	139	013+080	177	016+120	215	019+160
26	004+040	64	007+080	102	010+120	140	013+160	178	016+200	216	019+240
27	004+120	65	007+160	103	010+200	141	013+240	179	016+280	217	019+320
28	004+200	66	007+240	104	010+280	142	013+320	180	016+360	218	019+400
29	004+280	67	007+320	105	010+360	143	013+400	181	016+440	219	019+480
30	004+360	68	007+400	106	010+440	144	013+480	182	016+520	220	019+560
31	004+440	69	007+480	107	010+520	145	013+560	183	016+600	221	019+640
32	004+520	70	007+560	108	010+600	146	013+640	184	016+680	222	019+720
33	004+600	71	007+640	109	010+680	147	013+720	185	016+760	223	019+800
34	004+680	72	007+720	110	010+760	148	013+800	186	016+840	224	019+880
35	004+760	73	007+800	111	010+840	149	013+880	187	016+920	225	019+960
36	004+840	74	007+880	112	010+920	150	013+960	188	017+000	226	020+040
37	004+920	75	007+960	113	011+000	151	014+040	189	017+080	227	020+120
38	005+000	76	008+040	114	011+080	152	014+120	190	017+160	228	020+200

Nº	Progresiva	Nº	Progresiva	Nº	Progresiva	Nº	Progresiva
229	020+280	270	023+560	311	026+840	352	030+120
230	020+360	271	023+640	312	026+920	353	030+200
231	020+440	272	023+720	313	027+000	354	030+280
232	020+520	273	023+800	314	027+080	355	030+360
233	020+600	274	023+880	315	027+160	356	030+440
234	020+680	275	023+960	316	027+240	357	030+520
235	020+760	276	024+040	317	027+320	358	030+600
236	020+840	277	024+120	318	027+400	359	030+680
237	020+920	278	024+200	319	027+480	360	030+760
238	021+000	279	024+280	320	027+560	361	030+840
239	021+080	280	024+360	321	027+640	362	030+920
240	021+160	281	024+440	322	027+720	363	031+000
241	021+240	282	024+520	323	027+800	364	031+080
242	021+320	283	024+600	324	027+880	365	031+160
243	021+400	284	024+680	325	027+960	366	031+240
244	021+480	285	024+760	326	028+040	367	031+320
245	021+560	286	024+840	327	028+120	368	031+400
246	021+640	287	024+920	328	028+200	369	031+480
247	021+720	288	025+000	329	028+280	370	031+560
248	021+800	289	025+080	330	028+360	371	031+640
249	021+880	290	025+160	331	028+440	372	031+680
250	021+960	291	025+240	332	028+520		
251	022+040	292	025+320	333	028+600		
252	022+120	293	025+400	334	028+680		
253	022+200	294	025+480	335	028+760		
254	022+280	295	025+560	336	028+840		
255	022+360	296	025+640	337	028+920		
256	022+440	297	025+720	338	029+000		
257	022+520	298	025+800	339	029+080		
258	022+600	299	025+880	340	029+160		
259	022+680	300	025+960	341	029+240		
260	022+760	301	026+040	342	029+320		
261	022+840	302	026+120	343	029+400		
262	022+920	303	026+200	344	029+480		
263	023+000	304	026+280	345	029+560		
264	023+080	305	026+360	346	029+640		
265	023+160	306	026+440	347	029+720		
266	023+240	307	026+520	348	029+800		
267	023+320	308	026+600	349	029+880		
268	023+400	309	026+680	350	029+960		
269	023+480	310	026+760	351	030+040		

CARRIL IZQUIERDO

Nº	Progresiva	Nº	Progresiva	Nº	Progresiva	Nº	Progresiva	Nº	Progresiva	Nº	Progresiva
1	002+060	39	005+100	77	008+140	115	011+180	153	014+220	191	017+260
2	002+140	40	005+180	78	008+220	116	011+260	154	014+300	192	017+340
3	002+220	41	005+260	79	008+300	117	011+340	155	014+380	193	017+420
4	002+300	42	005+340	80	008+380	118	011+420	156	014+460	194	017+500
5	002+380	43	005+420	81	008+460	119	011+500	157	014+540	195	017+580
6	002+460	44	005+500	82	008+540	120	011+580	158	014+620	196	017+660
7	002+540	45	005+580	83	008+620	121	011+660	159	014+700	197	017+740
8	002+620	46	005+660	84	008+700	122	011+740	160	014+780	198	017+820
9	002+700	47	005+740	85	008+780	123	011+820	161	014+860	199	017+900
10	002+780	48	005+820	86	008+860	124	011+900	162	014+940	200	017+980
11	002+860	49	005+900	87	008+940	125	011+980	163	015+020	201	018+060
12	002+940	50	005+980	88	009+020	126	012+060	164	015+100	202	018+140
13	003+020	51	006+060	89	009+100	127	012+140	165	015+180	203	018+220
14	003+100	52	006+140	90	009+180	128	012+220	166	015+260	204	018+300
15	003+180	53	006+220	91	009+260	129	012+300	167	015+340	205	018+380
16	003+260	54	006+300	92	009+340	130	012+380	168	015+420	206	018+460
17	003+340	55	006+380	93	009+420	131	012+460	169	015+500	207	018+540
18	003+420	56	006+460	94	009+500	132	012+540	170	015+580	208	018+620
19	003+500	57	006+540	95	009+580	133	012+620	171	015+660	209	018+700
20	003+580	58	006+620	96	009+660	134	012+700	172	015+740	210	018+780
21	003+660	59	006+700	97	009+740	135	012+780	173	015+820	211	018+860
22	003+740	60	006+780	98	009+820	136	012+860	174	015+900	212	018+940
23	003+820	61	006+860	99	009+900	137	012+940	175	015+980	213	019+020
24	003+900	62	006+940	100	009+980	138	013+020	176	016+060	214	019+100
25	003+980	63	007+020	101	010+060	139	013+100	177	016+140	215	019+180
26	004+060	64	007+100	102	010+140	140	013+180	178	016+220	216	019+260
27	004+140	65	007+180	103	010+220	141	013+260	179	016+300	217	019+340
28	004+220	66	007+260	104	010+300	142	013+340	180	016+380	218	019+420
29	004+300	67	007+340	105	010+380	143	013+420	181	016+460	219	019+500
30	004+380	68	007+420	106	010+460	144	013+500	182	016+540	220	019+580
31	004+460	69	007+500	107	010+540	145	013+580	183	016+620	221	019+660
32	004+540	70	007+580	108	010+620	146	013+660	184	016+700	222	019+740
33	004+620	71	007+660	109	010+700	147	013+740	185	016+780	223	019+820
34	004+700	72	007+740	110	010+780	148	013+820	186	016+860	224	019+900
35	004+780	73	007+820	111	010+860	149	013+900	187	016+940	225	019+980
36	004+860	74	007+900	112	010+940	150	013+980	188	017+020	226	020+060
37	004+940	75	007+980	113	011+020	151	014+060	189	017+100	227	020+140
38	005+020	76	008+060	114	011+100	152	014+140	190	017+180	228	020+220

Nº	Progresiva	Nº	Progresiva	Nº	Progresiva	Nº	Progresiva
229	020+300	270	023+580	311	026+860	352	030+140
230	020+380	271	023+660	312	026+940	353	030+220
231	020+460	272	023+740	313	027+020	354	030+300
232	020+540	273	023+820	314	027+100	355	030+380
233	020+620	274	023+900	315	027+180	356	030+460
234	020+700	275	023+980	316	027+260	357	030+540
235	020+780	276	024+060	317	027+340	358	030+620
236	020+860	277	024+140	318	027+420	359	030+700
237	020+940	278	024+220	319	027+500	360	030+780
238	021+020	279	024+300	320	027+580	361	030+860
239	021+100	280	024+380	321	027+660	362	030+940
240	021+180	281	024+460	322	027+740	363	031+020
241	021+260	282	024+540	323	027+820	364	031+100
242	021+340	283	024+620	324	027+900	365	031+180
243	021+420	284	024+700	325	027+980	366	031+260
244	021+500	285	024+780	326	028+060	367	031+340
245	021+580	286	024+860	327	028+140	368	031+420
246	021+660	287	024+940	328	028+220	369	031+500
247	021+740	288	025+020	329	028+300	370	031+580
248	021+820	289	025+100	330	028+380	371	031+660
249	021+900	290	025+180	331	028+460		
250	021+980	291	025+260	332	028+540		
251	022+060	292	025+340	333	028+620		
252	022+140	293	025+420	334	028+700		
253	022+220	294	025+500	335	028+780		
254	022+300	295	025+580	336	028+860		
255	022+380	296	025+660	337	028+940		
256	022+460	297	025+740	338	029+020		
257	022+540	298	025+820	339	029+100		
258	022+620	299	025+900	340	029+180		
259	022+700	300	025+980	341	029+260		
260	022+780	301	026+060	342	029+340		
261	022+860	302	026+140	343	029+420		
262	022+940	303	026+220	344	029+500		
263	023+020	304	026+300	345	029+580		
264	023+100	305	026+380	346	029+660		
265	023+180	306	026+460	347	029+740		
266	023+260	307	026+540	348	029+820		
267	023+340	308	026+620	349	029+900		
268	023+420	309	026+700	350	029+980		
269	023+500	310	026+780	351	030+060		

3.2. PARAMETROS DE EVALUACION

- Deflexión máxima
- Radio de curvatura
- Cuenco de deflexiones
- Módulo resiliente

3.3. ENSAYO DE LA VIGA BENKELMAN

Una vez pesado el eje trasero del vehículo y de haber comprobado la presión de las llantas se comenzó con la primera progresiva se sitúa la viga Benkelman en el punto de medida, de modo que la punta del palpador quede situada sobre dicho punto y la palanca alineada con una paralela al eje de la calzada o con la dirección elegida para el movimiento del vehículo de carga como se ve en la figura 1 y figura 2.



FIGURA 1: UBICACION DEL PALPADOR VISTA FRONTAL



FIGURA 2: UBICACIÓN DEL PALPADOR VISTA TRASERA

Se montará la viga Benkelman, comenzando por la unión de los tres tramos de la palanca de medida. Luego se coloca el nivel, el comparador y finalmente se procede a revisar si la varilla y la marca del brazo de la viga se encuentran perpendiculares. Se comprobará el correcto funcionamiento de todo el conjunto.



FIGURA 3: MONTAJE DE LA VIGA BENKELMAN

Se anotara la lectura máxima L_0 del comparador, que se produce generalmente en las proximidades del paso del eje de las ruedas (centro de la carga) sobre la vertical del punto de medida.



FIGURA 4: LECTURA INICIAL DEL EXTENSOMETRO CON PRECISIÓN DE 0.01

Se desplaza nuevamente el camión hasta que el centro de carga se encuentre a 25 cm del punto de medida, y se anota la lectura L_{25} después de 5 seg de aplicación de la carga.

De nuevo se desplaza el camión hasta que el centro de la carga se encuentre a 30 cm del punto de medida, y se anota la lectura L_{30} después de 5 seg de aplicación de la carga.

Una vez más se desplaza el camión hasta que el centro de la carga se encuentre a 40 cm del punto de medida, y se anota la lectura L_{40} después de 5 seg de aplicación de la carga.



FIGURA 5: LECTURA A UNA DISTANCIA DE 40 cm

Una vez más se desplaza el camión hasta que el centro de la carga se encuentre a 50 cm del punto de medida, y se anota la lectura L_{50} después de 5 seg de aplicación de la carga.

Se avisa al conductor para que desplace el vehículo hasta que el centro de carga se aleje más de 500 cm del punto de medida.

Se anota la lectura final (L_f) $L > 500$ después de parado el camión, cuando la variación de la lectura del comparador sea inferior a 0.01mm en 5seg.

Se procederá a buscar un orificio de 20 a 50 mm de profundidad con diámetro suficiente para la introducción del bulbo del termómetro y de esta manera realizar la lectura de la temperatura.



FIGURA 6: LECTURA DE LA TEMPERATURA

Se realizan estos ensayos cada 80 m a lo largo de la vía, en cada carril.



FIGURA 7: MEDICION EN OTRA PROGRESIVA

3.4. NUMERO DE MUESTRAS

Se extrajeron 372 muestras en el carril derecho y 371 muestras en el carril izquierdo, cada una de las muestras cuenta con siete lecturas del extensómetro a 0 cm, 25 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 75 cm y a más de 500 cm. (VER ANEXO 1)

3.5. CALCULOS DE DEFLEXIONES, CORRECCION POR TEMPERATURA Y ESTACIONALIDAD

El cálculo de deflexiones y sus respectivas correcciones se la realiza en gabinete, es necesario mencionar que cuando se realiza un programa de auscultación de una vía, se busca evaluar la capacidad estructural del pavimento en este caso la capacidad del suelo de fundación.

El procedimiento para el cálculo de deflexiones es simple. Para el caso de la deflexión máxima, se debe calcular la diferencia entre la lectura inicial y la lectura final.

$$D_{max} = (L_i - L_f) * 2$$

ECUACION 2

Y para encontrar la deflexión a una determinada distancia, se deberá realizar la diferencia entre la lectura a una distancia X y la lectura final.

$$D_x = (L_x - L_f) * 2$$

ECUACION 3

La diferencia se multiplica por 2, debido a que la relación de brazos de la viga Benkelman es empleada es de 1:2.

La temperatura de la capa asfáltica de rodadura influencia en el valor de la deflexión, así como la capacidad de deformación de los suelos está influenciada por el grado de saturación que experimentan por lo que se procedió a corregir las deflexiones en

función a la temperatura media y al coeficiente C que depende de la naturaleza del suelo subrasante y el periodo característico de la zona.

A fin de referir todas las deflexiones a una temperatura standard de 20 °C y a las mismas condiciones ambientales, se emplea la siguiente expresión.

$$FACTOR DE COORRECCION = \frac{C}{(K * (t - 20) * e + 1)}$$

ECUACION 4

Donde:

C= Coeficiente de corrección por condiciones ambientales que en este caso será igual a 1.

K= coeficiente igual a 1×10^{-3} (1/cm°C)

t= temperatura del asfalto medida para cada ensayo en °C.

e= espesor de la carpeta asfáltica (6 cm).

En el ANEXO 2 se encuentran los resultados de las deflexiones a las distancias de 0 cm, 25 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm y 75 cm de cada una de las progresivas analizadas de cada carril las mismas se encuentran corregidas por temperatura y estacionalidad.

Los dos parámetros utilizados para determinar el comportamiento estructural de un pavimento son la deflexión admisible y la deflexión característica, que involucra conceptos estadísticos como promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.

DETERMINACION DE DEFLEXIONES EN EL CARRIL DERECHO

*

PARAMETROS

Numero= 333 muestras

Se tienen 333 muestras debido a que algunos datos se depuraron por que se encontraban fuera del rango, dando resultados muy elevados o muy pequeños.

DETERMINACION DE LA DEFLEXION MAXIMA

$$D_{max} = (L_i - L_f) * 2$$

Se obtuvo la deflexión máxima promedio

$$D_p = \frac{\sum d}{n}$$

$D_{promedio} = 46.97 (0.01)mm$

DESVIACION ESTANDAR

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d - D)^2}{n - 1}}$$

$$\sigma = 3.90$$

**DEFLEXION
CARACTERISTICA**

$$D_c = D_p + t * \sigma$$

Convencionalmente se utiliza un valor de $t=1.645$, lo que equivale a considerar que, solo un 5% del área total del pavimento, tendrá deflexiones mayores a D_c .

$$D_{\text{caracteristica}} = 53.38 \text{ (0.01)mm}$$

**DEFLEXION
ADMISIBLE**

la deflexión admisible de diseño que fue proporcionada por la ABC es de 90 (0.01) mm

**El valor característico es calculado por la deflexión máxima corregida por los factores de humedad y temperatura. Teniendo la media de las deflexiones de cada tramo homogéneo y así mismo la desviación típica.

**DETERMINACION DE
DEFLEXIONES CARRIL IZQUIERDO**

*

PARAMETROS

Numero= 337 muestras

...se tienen 337 muestras debido a que algunos datos se depuraron por que se encontraban fuera del rango, dando resultados muy elevados o muy pequeños.

DETERMINACION DE LA DEFLEXION MAXIMA

$$D_{max} = (L_i - L_f) * 2$$

...Se obtuvo la deflexión máxima promedio

$$D_p = \frac{\sum d}{n}$$

$$D_{promedio} = 43.51 \text{ (0.01)mm}$$

DESVIACION ESTANDAR

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d - D)^2}{n - 1}}$$

$$\sigma = 5.78$$

DEFLEXION CARACTERISTICA

$$D_c = D_p + t * \sigma$$

Convencionalmente se utiliza un valor de $t=1.645$, lo que equivale a considerar que, solo un 5% del área total del pavimento, tendrá deflexiones mayores a D_c .

$$D_{\text{característica}} = 53.02 \text{ (0.01)mm}$$

DEFLEXION

ADMISIBLE

la deflexión admisible de diseño que fue proporcionada por la ABC es de 90 (0.01)mm

**El valor característico es calculado por la deflexión máxima corregida por los factores de humedad y temperatura. Teniendo la media de las deflexiones de cada tramo homogéneo y así mismo la desviación típica.

3.6. CALCULO DEL RADIO DE CURVATURA

El cálculo del radio de curvatura que experimenta la superficie del pavimento se lo realiza a partir de la deflexión máxima y la deflexión a los 25 cm a partir del punto máximo de deflexión, durante la aplicación de la carga es de forma parabólica.

El radio de curvatura fue calculado para cada progresiva. (VER ANEXO 3)

Se obtuvo los valores máximos y mínimos de cada carril así como el radio de curvatura medio de todo el tramo Cruce-Túnel Falda la Queñua.

$$R = \frac{3125}{(D_0 - D_{25})}$$

ECUACION 5

	RADIO DE CURVATURA (m)		
	MAXIMO	MINIMO	MEDIA
CARRIL DERECHO	755	116	216
CARRIL IZQUIERDO	846	113	282
TRAMO COMPLETO	801	115	249

3.7. CUENCO DE DEFLEXIONES

Para la obtención del cuenco de deflexión, se tomó las deflexiones corregidas por temperatura y estacionalidad, con el cuenco de deflexiones se pudo observar la recuperación progresiva que la estructura presenta al ser descargada. Las gráficas del cuenco de deflexiones cuentan con 6 puntos. Al conjunto de dichas deflexiones registradas es a lo que se denomina cuenco de deflexión.

A partir de las deflexiones obtenidas para cada carril se realizó un modelo para todo el tramo.

DEFLECCIONES (0,01mm)					
Do	D25	D30	D40	D50	D75
0 cm	25 cm	30 cm	40 cm	50 cm	75 cm
45.05	32.26	26.77	22.60	17.78	9.79



Dicho de otro modo, se buscó representar el cuenco de forma gráfica por lo mismo solo se anexo 15 graficas por cada carril; podemos pensar que dicha deformación es la que experimenta el pavimento bajo la aplicación de una carga permanente en el tiempo. (ANEXO 4)

3.8. CALCULO DEL MODULO RESILIENTE

Se siguió el procedimiento con el modelo de HOGG que usa la deflexión en el centro de la carga y una de las deflexiones adicionales fuera del punto inicial de aplicación de carga para cada progresiva.

- 1) De la curva de deflexión medida se selecciona el valor de la deflexión máxima D_o y una deflexión adicional D_r correspondiente a la distancia radial r que en la mayoría de los casos se considera un $r=40$ cm debido a que a esa distancia se encuentra más del 50% de la deflexión máxima según los estudios realizados por HOGG.

A partir de:

$$\frac{Dr}{Do} \geq 0.426$$

Entramos
a tabla

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

COEFICIENTES DE AJUSTE DE
CURVA

$$\alpha = 0.548$$

$$\beta = 2.629$$

$$B = 0$$

$$r = 40 \text{ cm}$$

2) Calculamos el producto $Do * r_{50}$

$$Do * r_{50}$$

2) A partir de obtener Dr y r_{50} se puede calcular el Modulo Resiliente o Modulo De Elasticidad de la sub Rasante con el modelo de HOGG donde a partir del programa DEFLECTOR se obtuvo una ecuación para un módulo de Poisson $\mu=0.40$.

$$Eo = 1091314.96 * (Do * r_{50})^{-0.939}$$

En el ANEXO 5 se encuentra los resultados del módulo resiliente de las progresivas de cada carril.

Se obtuvo un módulo resiliente para todo el tramo con una media aritmética de ambos carriles.

MODULO RESILIENTE DE TODO ELTRAMO= 19364.85 psi

MODULO RESILIENTE DE TODO ELTRAMO= 133.50 Mpa

MODULO RESILIENTE DE TODO ELTRAMO= 1361.33 Kg/cm2

3.9. ENSAYO DE VALIDACION

Se ubicó dos progresivas una en el carril derecho (022+360) y otra en el carril izquierdo (028+540) para realizar las calicatas y obtener una muestra del suelo de fundación.

Se realizó una calicata de 60x60 cm y una profundidad de aproximadamente 70 cm para obtener una muestra de aproximadamente 50 Kg del suelo de fundación.



FIGURA 8: CALICATA DE 60 cm x 60 cm



FIGURA 9: MUESTRA

A través de las muestras obtenidas de las calicatas se realizó el análisis granulométrico.



FIGURA 10: TAMICES PARA EL ANALISIS GRANULOMETRICO

Se realizaron los ensayos de límite líquido y límite plástico, posteriormente al contar con todos los resultados se prosiguió a clasificar el suelo de fundación a través de la AASHTO.

Posteriormente para obtener el CBR se realizó la relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193)



FIGURA 11: CBR DE LABORATORIO

A través del ensayo CBR pudimos obtener el módulo resiliente con una ecuación empírica. (VER ANEXO 6)

3.10. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Al realizar la evaluación estructural del pavimento nos basamos en el modelo matemático de HOGG donde se realizó el análisis de las curvas de deflexiones medidas, para este análisis de curvas se tuvo como base dos principios básicos:

- a) La deflexión máxima como indicador de la capacidad de soporte del suelo de fundación.

- b) El radio de curvatura que adopta el pavimento nos indicara la calidad y resistencia de las capas superiores del pavimento.

DEFLEXIONES

En los resultados obtenidos se pudo verificar que la deflexión máxima no supera los 70 (0.01)mm encontrándose un 22 % debajo de la deflexión admisible de diseño con la que fue diseñada la capa subrasante o suelo de fundación, dándonos a conocer que la capacidad soporte del suelo de fundación se encuentra en óptimas condiciones.

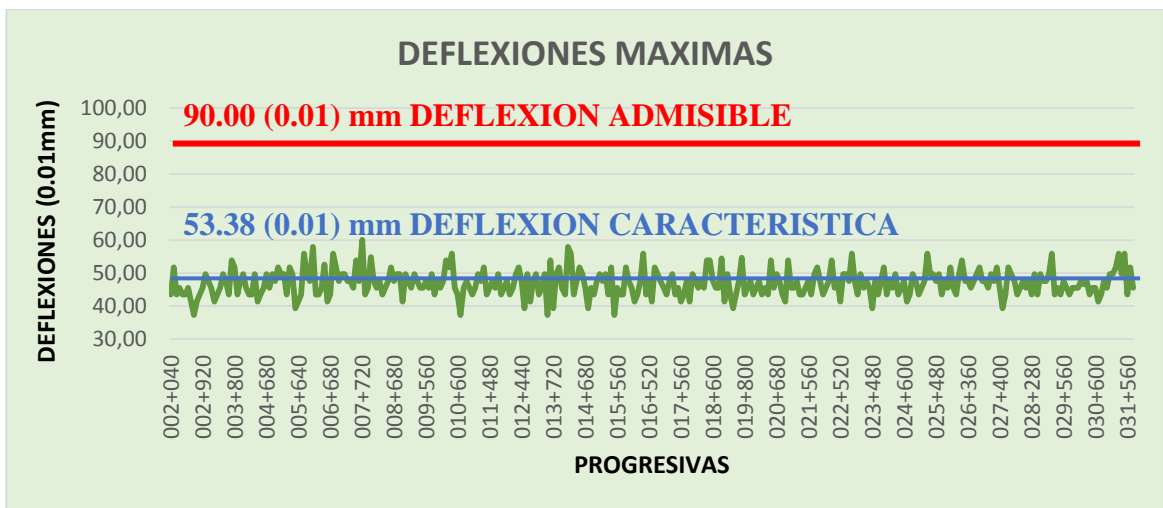


GRAFICO 1: DEFLEXIONES MAXIMAS (CARRIL DERECHO)

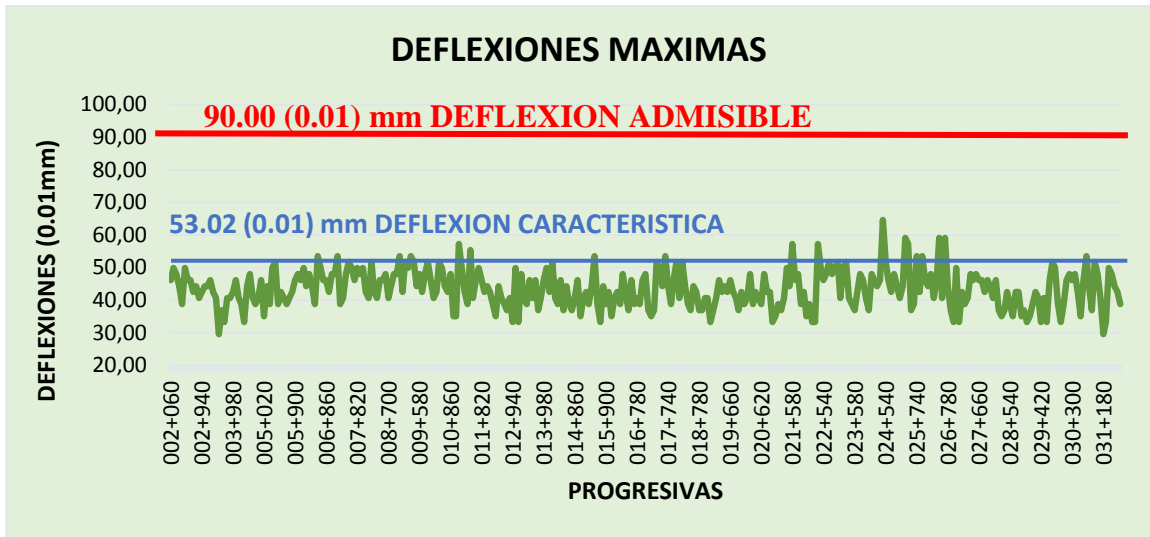


GRAFICO 2: DEFLEXIONES MAXIMAS (CARRIL IZQUIERDO)

En el **GRAFICO 1** y **GRAFICO 2** podemos observar las deflexiones máximas que presentan cada una de las progresivas.

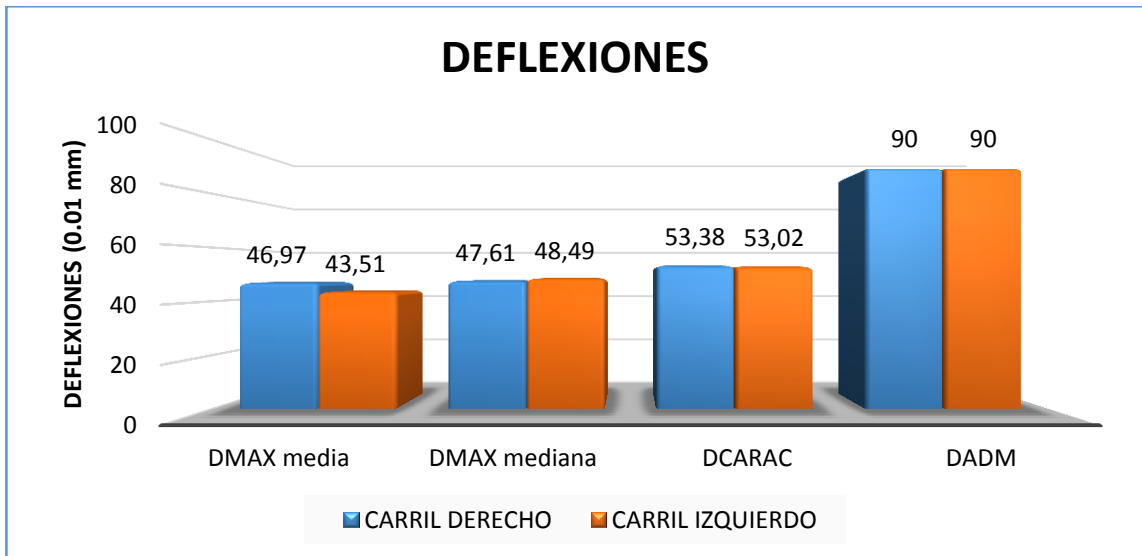


GRAFICO 3: DEFLEXIONES

En el **GRAFICO 3** se expone los resultados finales de las deflexiones obtenidas dándonos a conocer que en ningún caso la deflexión admisible es menor a la deflexión característica y la misma es mayor a la deflexión máxima. Encontrándose

resultados que se encuentran dentro de un rango determinado según el análisis estadístico de la mediana.

RADIO DE CURVATURA

Los valores del radio de curvatura que se presentan en ningún caso son menores a 80m, encontrándose entre 113 m y 846 m demostrando un adecuado comportamiento estructural de las capas superiores de la estructura del pavimento flexible que se encuentran sobre la subrasante. En el caso de los valores que se encuentran entre 100m y 200m indican un comportamiento de suficiencia estructural de la estructura, en curvas superiores a 300 m indican un adecuado comportamiento estructural, y los valores superiores a 600 m son sumamente adecuados, en ningún caso el tramo Cruce Túnel Falda la Queñua indica un estado de colapso o falla.

	RADIO DE CURVATURA (m)		
	MAXIMO	MINIMO	MEDIA
CARRIL DERECHO	755	116	216
CARRIL IZQUIERDO	846	113	282
TRAMO COMPLETO	801	115	249

GRAFICO 4: RADIOS DE CURVATURA

CUENCO DE DEFLEXIONES

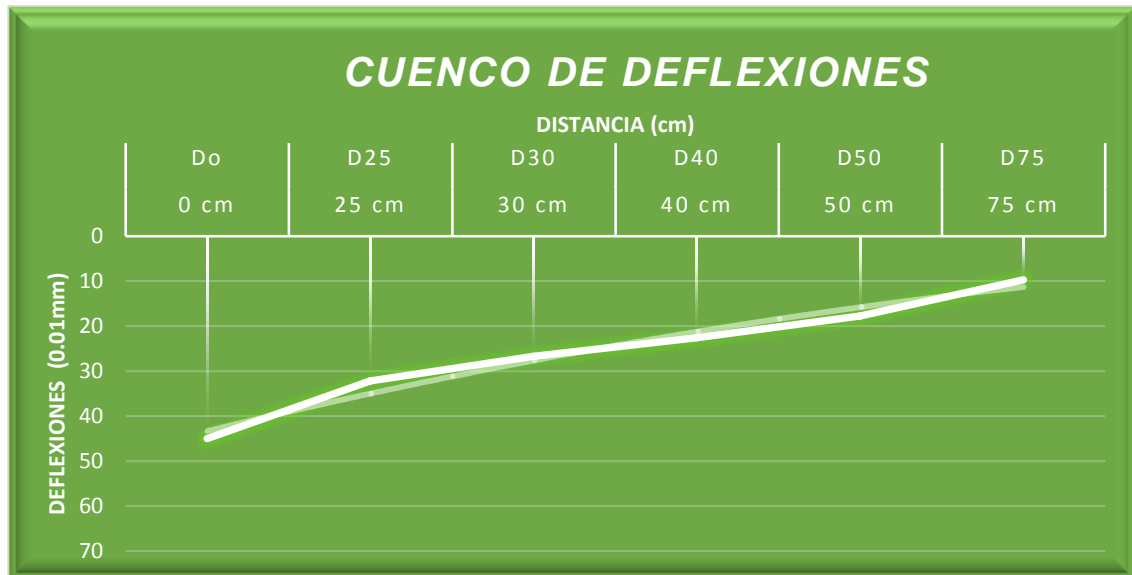


GRAFICO 5: CUENCO DE DEFLEXIONES DEL TRAMO CRUCE-TUNEL FALDA LA QUEÑUA

El cuenco de deflexiones es una forma gráfica de representar las deflexiones que experimenta el pavimento bajo la aplicación de una carga, el **GRAFICO 5** nos permite observar la recuperación del pavimento cuando este es descargado progresivamente, la deflexión permite ser correlacionada con la capacidad estructural de un pavimento, de manera que en el caso de la evaluación que se presenta la deflexión es baja quiere lo que nos indica que el modelo estructural del pavimento tiene buena capacidad estructural.

MODULO RESILIENTE

El módulo de elasticidad o módulo de resiliencia del suelo de fundación que participa en la deformación del sistema pavimento-subrasante es una característica fundamental para verificar el diseño del pavimento, el mismo se lo obtuvo a través del Modelo de HOGG que es considerado como el instrumento teórico para la

interpretación de curvas de deflexión dándonos un módulo de resiliencia de **133.501MPa** lo cual indica una subrasante en óptimas condiciones, por lo que pavimento no presentara fallas, rupturas, ni agrietamientos de ningún tipo.

Al realizar el ensayo de validación CBR relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193) se pudo obtener un CBR de 29.25 % a través del cual por medio de una ecuación empírica se obtuvo un módulo resiliente de **152.715 MPa**.

CUENCO DE DFLEXIONES					
IZQUIERDO			DERECHO		
MODULO RESILIENTE PONDERADO=	19317.89	psi	MODULO RESILIENTE PONDERADO=	19411.81	psi
MODULO RESILIENTE PONDERADO=	133.18	MPa	MODULO RESILIENTE PONDERADO=	133.82	MPa
MODULO RESILIENTE PONDERADO=	1249.18	Kg/cm2	MODULO RESILIENTE PONDERADO=	1242.59	Kg/cm2
CBR					
IZQUIERDO			DERECHO		
MODULO RESILIENTE (CBR)=	21634.45	psi	MODULO RESILIENTE (CBR)=	22669.35	psi
MODULO RESILIENTE (CBR)=	149.15	Mpa	MODULO RESILIENTE (CBR)=	156.28	Mpa
MODULO RESILIENTE (CBR)=	1520.89	Kg/cm2	MODULO RESILIENTE (CBR)=	1593.64	Kg/cm2

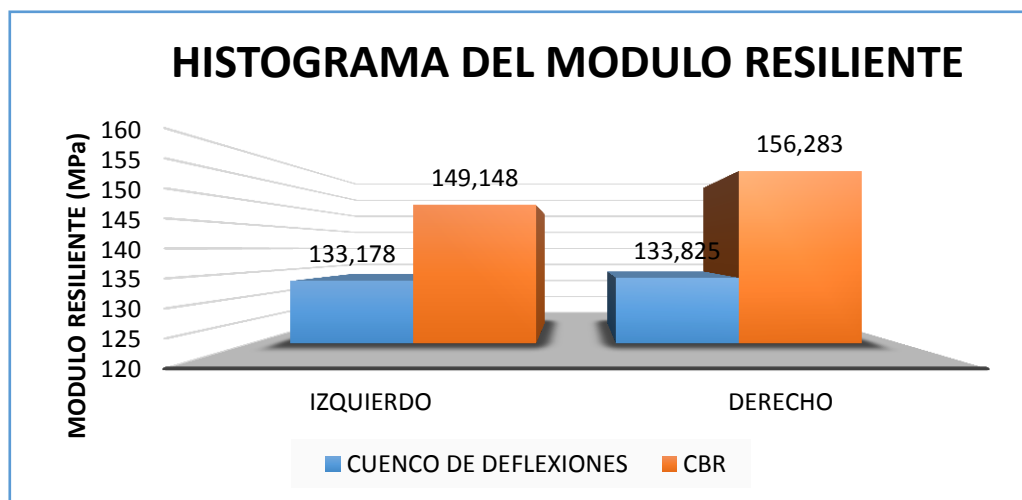


GRAFICO 6: MODULO DE RESILENCIA POR CARRIL

CUENCO DE DEFLEXION		
MODULO RESILIENTE DE TODO ELTRAMO=	19364.850	psi
MODULO RESILIENTE DE TODO ELTRAMO=	133.501	MPa
MODULO RESILIENTE DE TODO ELTRAMO=	1245.885	Kg/cm2
CBR		
MODULO RESILIENTE DE TODO ELTRAMO=	22151.903	psi
MODULO RESILIENTE DE TODO ELTRAMO=	152.715	Mpa
MODULO RESILIENTE DE TODO ELTRAMO=	1557.262	Kg/cm2

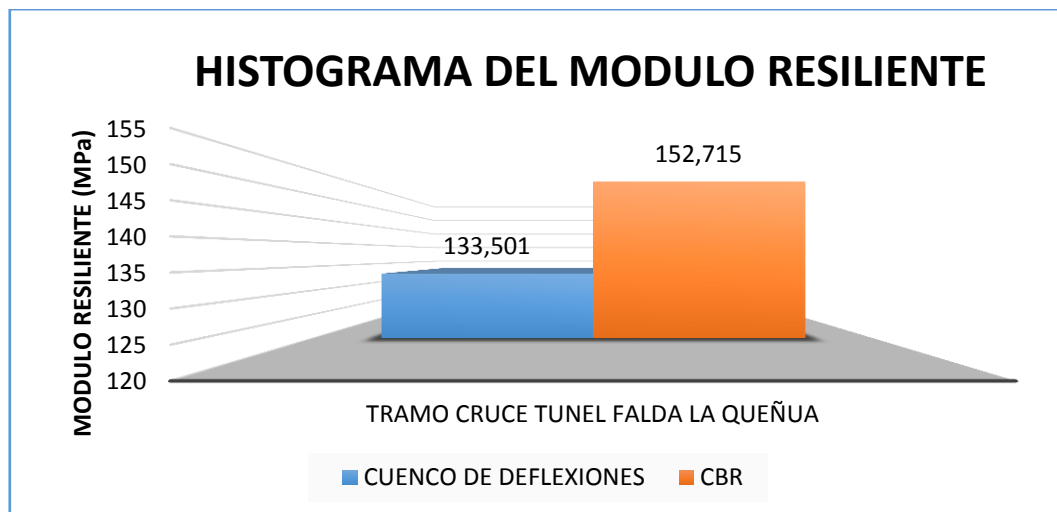


GRAFICO 7: MODULO DE RESILENCIA DEL TRAMO CRUCE-TUNEL FALDA LA QUEÑUA

Si comparamos los resultados obtenidos por ambos métodos, se puede resaltar que el módulo resiliente obtenido por el CBR es mayor al obtenido por el Modelo de HOGG, esto es debido a que el método del CBR es un método directo en el cual se analiza el suelo de fundación en el laboratorio, mientras los parámetros del cuenco de deflexiones obtenidos a través de la viga Benkelman es una manera indirecta de evaluar el estado de la subrasante y de obtener datos para poder utilizar el Modelo de HOGG.

ANALISIS DE PROBABILIDADES

Al realizar el análisis de probabilidades de la curva de Gauss se obtuvo que 77.69% de nuestros resultados se encuentran dentro de los rangos establecidos para el módulo de resiliencia de la subrasante, encontrándose el valor más bajo dentro de lo establecido por las normas de diseño.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se realizó la evaluación estructural del pavimento basándonos en el Modelo matemático de HOGG a partir del análisis de curvas, tomando en cuenta la deflexión máxima como indicador de la capacidad soporte del suelo de fundación y el radio de curvatura que nos dio a conocer la calidad y resistencia de las capas superiores del pavimento.
- Se ubicaron las progresivas a lo largo tramo cada 80 m para poder realizar los ensayos con la viga Benkelman.
- Se realizó el ensayo de la viga Benkelman montando el equipo en cada progresiva para poder obtener las lecturas de las deflexiones a través del extensómetro.
- Se verifico que la deflexión máxima no supera los 70 (0.01 mm), encontrándose un 22 % por debajo de la deflexión admisible con la que fue diseñada la capa subrasante,
- Se comprobó que la deflexión máxima no fuera mayor a la deflexión característica y que la deflexión característica no fuera mayor a la deflexión admisible.
 - Carril derecho (46.97<53.38<90) 0.01 mm
 - Carril izquierdo (43.51<53.02<90) 0.01 mm

Dándonos a conocer que la capacidad soporte del suelo de fundación se encuentra en óptimas condiciones.

- Se obtuvo los valores del radio de curvatura en ambos carriles demostrándonos que el comportamiento estructural de las capas superiores de la estructura del pavimento flexible que se encuentran

sobre la subrasante ya que los mismos se encuentran en un rango de 116 m y 755 m, descartando de esta manera que en el tramo se puedan producir fallas o rupturas precoces.

- Se comprobó que la deflexión respectiva corresponde al 50 % de la deflexión máxima a una distancia radial $r=40$ cm por lo que indica un buen comportamiento del suelo de fundación ante las cargas a las que es sometido.
- Se obtuvo el módulo resiliente de 133.51 MPa a través del Modelo de HOGG el cual nos indica que la subrasante se encuentra en óptimas condiciones ya que todas las deformaciones que se presentan son recuperables en el tiempo.
- Se realizó el ensayo de validación CBR relación de soporte del suelo en el laboratorio obteniendo un CBR de 29.25 %, caracterizando al suelo de fundación como óptimo.
- Se calculó el módulo resiliente a través de una ecuación empírica teniendo como parámetro al CBR obtenido en laboratorio, dando como resultado un módulo resiliente de 152.715 MPa.
- Se analizó los resultados obtenidos por un método directo como es el del CBR y un método indirecto como es el de la Viga Benkelman.

4.2. RECOMENDACIONES

Al realizar el ensayo de la viga Benkelman se debe tomar en cuenta que se es un equipo muy sensible por lo que se deben tomar en cuenta muchos aspectos como ser la temperatura, la presión constante de la llantas ya que estos pueden causar de manera directa lecturas fallidas que pueden conducir a equivocaciones a la hora de realizar los cálculos.

Por lo que se pudo observar la viga Benkelman nos conduce a una evaluación precisa de lo que es una carretera ya sea que esta se encuentre deteriorada con el tiempo o algunas que se pusieron recientemente a disponibilidad de la población automotora ya que nos permite comprobar si la misma fue diseñada bajo las normas establecidas.