

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Las vías de comunicación y de entre ellas las carreteras, en función al buen estado de los pavimentos impactan de forma positiva en el desarrollo social, económico y cultural de un país, son obras estratégicas ya que las mismas permiten el tránsito ininterrumpido a elevados volúmenes de demanda de tránsito, en los que coexistirán vehículos rápidos y lentos (automóviles y camiones), contar con vías adecuadas permite garantizar al usuario seguridad y comodidad al conducir, por ello es importante prever que la estructura de la vía sea la más eficiente para soportar los esfuerzos generados por la acción del tránsito y la temperatura, estos esfuerzos tienen un efecto adverso sobre los pavimentos, deteriorándolos y provocando condiciones que comprometen su desempeño estructural.

La medición del desempeño de un pavimento en este caso rígido ocasiona una dificultad conceptual que depende del objetivo propio de la evaluación, ya sea la condición estructural o bien la condición funcional de su superficie.

El desempeño estructural de un pavimento rígido es la capacidad que tiene para soportar las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales, es un hecho que los pavimentos generalmente se encuentran expuestos todo el tiempo a los efectos de la intemperie y las cargas, por ello es inevitable impedir su deterioro a través del tiempo, sin embargo, se espera que éste no sea significativo durante el periodo de vida útil para el cual fueron diseñados.

Para contrarrestar los posibles daños estructurales sobre el pavimento rígido, prevenir el deterioro acelerado y fallas prematuras, se tiene la alternativa de la incorporación de soportes laterales que cumplen la función de alejar las cargas de los puntos más críticos de la losa.

En el presente proyecto se realizará el análisis de la optimización del desempeño estructural de pavimento rígido mediante la utilización de soporte lateral, aplicado en una carretera cuyo proceso consistirá en modelar al pavimento en condiciones con soporte lateral y en condiciones de sin soporte lateral, para ambos casos se procederá a simular

los efectos generados por ejes de carga y gradiente térmico, teniendo como respuesta los esfuerzos y deflexiones que se generan y de los resultados obtenidos poder analizar la magnitud que implica la utilización de soporte lateral.

1.2 SITUACIÓN PROBLÉMICA

Las vías de comunicación son esenciales para el desarrollo económico, social y cultural de un país. En Bolivia se tienen caminos y carreteras, las cuales están conformadas por diferentes tipos de pavimentos y otras simplemente de tierra, sabemos que las carreteras al estar pavimentadas ofrecen una superficie de rodadura uniforme que repercute positivamente en la comodidad del viaje y la reducción de tiempos, gastos de combustible, repuestos y mantenimiento.

Dada la importancia que tienen las carreteras, se busca que estas cumplan positivamente su objetivo, para ello los pavimentos deben encontrarse en buenas condiciones y sean capaces de soportar las cargas generadas por las acciones del clima y del tránsito vehicular siendo estos, unas de las principales causas de fallas en los pavimentos.

Los pavimentos rígidos son un tipo de pavimento que se caracteriza por su durabilidad y por requerir de una baja cantidad de mantenimiento. Como todo pavimento, su diseño debe tomar en cuenta factores de tránsito, climáticos y estructurales, como ser: tipos de vehículos, carga en los ejes, humedad, gradientes térmicos, fricción losa-subbase, presencia de agua en la sub-estructura y soporte lateral.

La necesidad de realizar diseños más eficientes que permitan aprovechar de mejor manera los recursos que se invierten en su construcción, nos direcciona a realizar un análisis que nos permita determinar los beneficios que implica la utilización de soporte lateral en los pavimentos rígidos, así como las variaciones de respuesta estructural que se obtengan en situaciones en el que el pavimento cuente con soporte lateral y sin soporte lateral, con la intención de poder ponderar estos factores al momento de la toma de decisiones relacionadas con su diseño.

1.2.1 Problema

¿Qué tan eficiente es el soporte lateral de hormigón (berma), para mejorar el desempeño estructural de un pavimento rígido con acero de refuerzo, analizando su respuesta estructural teórica, por medio del modelador computacional de elementos finitos, EverFE?

1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema

Considerando la importancia que tienen las carreteras para el desarrollo de un país, y a la necesidad de realizar diseños más eficientes, resulta positiva la elaboración de un estudio que permita determinar el grado en que impacta la utilización de soporte lateral en los pavimentos rígidos. A pesar de que la utilización de soporte lateral es considerada útil para la mejora de la capacidad estructural y el desempeño de las losas de pavimentos rígidos, lo que se pretende es cuantificar tal beneficio reflejado en la respuesta estructural teórica del mismo aplicado a un pavimento existente.

Es por ello que se desarrollara un análisis comparativo aplicado a un pavimento existente que permita identificar de qué manera ayuda en su optimización, la presencia del soporte lateral.

1.2.3 Delimitación temporal y espacial del problema

La presente investigación se elaborará en el transcurso del segundo semestre correspondiente a la gestión 2020, comprendido entre el mes de agosto hasta la primera semana de enero de la gestión 2021, las fechas fueron adaptadas en función a la situación sanitaria ocasionada por la pandemia, las actividades necesarias para lograr el objetivo planteado están divididas mediante etapas con miras a la recolección de los datos necesarios que van desde el trabajo de campo con la obtención de muestras, la caracterización de los materiales en el laboratorio de la UAJMS y el trabajo de gabinete.

El espacio geográfico que aborda esta investigación, se localiza en el tramo carretero que conecta a las poblaciones de Campo Pajoso – Caraparí, perteneciente a la provincia Gran Chaco del departamento de Tarija.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En el presente trabajo se realizará el análisis de la optimización del desempeño estructural de pavimento rígido mediante la utilización de soporte lateral.

Con ello se busca determinar la respuesta estructural del pavimento utilizando un modelador computacional de elementos finitos EverFE 2.26. Para dicho trabajo se considerará las características propias de los materiales que fueron utilizados en la construcción del tramo en estudio, y se simulara al pavimento para los casos en él que se encuentre lateralmente soportado y sin soporte lateral.

Con la modelación del pavimento rígido con y sin soporte lateral podemos obtener los esfuerzos y deflexiones en puntos claves dentro de la sección de las losas, la respuesta de la estructura respecto a cargas vehiculares por eje y el efecto de la temperatura, serán utilizados para el análisis estructural del pavimento.

Además, con la realización de este análisis se podrá verificar los beneficios, ventajas y/o desventajas que conlleva el uso de los soportes laterales aplicados en el pavimento rígido, así mismo se obtendrán resultados de los cuales se podrá cuantificar los efectos que los diferentes casos de carga ocasionan sobre un pavimento.

La realización de este análisis será de utilidad a los profesionales de la Ingeniería Civil, en el área de diseño o construcción de pavimentos rígidos, ya que los resultados de este proyecto podrán permitir conocer la magnitud del beneficio de la utilización de soporte lateral, pudiendo con ello considerar dichos beneficios al momento de tomar decisiones relacionadas con la estructura del diseño de un pavimento rígido.

A los estudiantes para que puedan utilizar este documento como guía en la utilización del software para el modelado del pavimento rígido.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Realizar un análisis de la optimización del desempeño estructural de pavimento rígido mediante la utilización de soporte lateral, aplicado al tramo Campo Pajoso – Caraparí.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar el tramo y establecer los puntos de estudio.
- Recopilar la información necesaria del pavimento existente.
- Utilizar un software que permita simular los esfuerzos críticos y deflexiones que se produzcan en los puntos de estudio del tramo ante las acciones de cargas de tráfico y gradiente térmico.
- Determinar los esfuerzos máximos producidos y sus respectivas deflexiones en los puntos de estudio por medio del modelador computacional de elementos finitos EverFE 2.26, bajo los escenarios propuestos.
- Comparar los esfuerzos y deflexiones más críticos presentados en las losas bajo la acción de cargas de tránsito por eje y efecto combinado de cargas.
- Analizar los resultados del control de diseño estructural por fatiga, en función al espesor del pavimento.
- Establecer las conclusiones y recomendaciones producto del análisis realizado.

1.5 HIPÓTESIS

Si realizamos un análisis del desempeño estructural de pavimento rígido, efectuando la modelación de losas de pavimento de concreto hidráulico con y sin soporte lateral para la obtención de la respuesta estructural del mismo, este nos brindara la oportunidad de verificar la variación de los esfuerzos y deflexiones producidas bajo los escenarios más desfavorables de cargas.

1.6 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

1.6.1 Variable independiente

Análisis de la respuesta estructural del pavimento rígido.

1.6.2 Variable dependiente

Esfuerzos y deflexiones del pavimento rígido con soporte lateral y sin soportes lateral.

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variable		Definición conceptual	Dimensión	Indicadores
Independiente	Análisis de la respuesta estructural de pavimento rígido	La capacidad estructural del pavimento implica soportar las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales.	Respuesta estructural	Modelado aplicando un software de elementos finitos
	Dependiente	Esfuerzos y deflexiones del pavimento rígido con soporte lateral y sin soportes laterales.	Esfuerzos	N/mm ²
		Cuando se aplica una carga en la superficie de un pavimento, este se desplaza conformando lo que se denomina curva o cuenco de deflexión.	Deflexión	mm

Fuente: Elaboración propia

1.7 IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente proyecto corresponde según el tipo a una investigación aplicada.

1.7.1 Según su enfoque

Tiene un enfoque cuantitativo, porque se evaluarán las tensiones generadas en las losas, para cada uno de los escenarios planteados en el estudio, mediante el uso del software EverFE 2.26.

1.7.2 Según su alcance

Tiene un alcance descriptivo, ya que se buscó especificar los parámetros y características de un pavimento rígido existente, sometido a un análisis de respuesta estructural, para representar en función de las variables de estudio, los beneficios que conlleva la utilización de soporte lateral.

1.7.3 Línea de investigación

Pavimentos.

1.8 UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL

1.8.1 Unidad de estudio

Este proyecto de investigación considera como su unidad al desempeño estructural del pavimento rígido en base a la respuesta estructural del mismo al aplicarle cargas de tránsito por eje y gradiente térmico, en los puntos críticos (borde y esquina).

1.8.2 Población

Para la elaboración del proyecto se tiene como población, al análisis de esfuerzos y deflexiones mediante el modelado del pavimento rígido utilizando un software de elementos finitos, por medio del cual se obtendrá la respuesta estructural teórica del pavimento ante la presencia de cargas de tránsito por eje y gradiente térmico.

1.8.3 Muestra

Se tiene como muestra para el desarrollo del proyecto un tramo de la red vial fundamental correspondiente al departamento de Tarija; tramo Campo Pajoso - Caraparí, mismo que en función a su diseño original se retomaran algunos parámetros para conseguir modelar la estructura.

1.8.4 Selección de las técnicas de muestreo

El muestreo se llevará a cabo para obtener la caracterización de los materiales que forman parte del paquete estructural existente que son; la capa sub base y la sub rasante, para ello se tomarán muestras de puntos específicos del tramo elegido y luego mediante ensayos en laboratorio se procederá a caracterizar los mismos, también se realizaran las mediciones de la geometría y espesor de las losas en campo.

1.9 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

1.9.1 Métodos

Se aplicará el método inductivo, ya que este método parte de los fenómenos particulares cuya incidencia forma la ley de lo particular a lo general, el método inductivo necesariamente tiene que partir de una noción anterior de lo que se pretende analizar, a esto se le agregan los resultados del análisis realizado, es decir, lo que ya existe en una hipótesis o idea constituye el núcleo básico de la inducción. El método inductivo, inicia por la observación de determinados hechos, los cuales registra, analiza y luego clasifica

la información obtenida, establece patrones, hace generalizaciones, para inferir, de todo lo anterior, una explicación o teoría.

Es así que se aplicara el método inductivo para la realización del presente proyecto, basándose en la obtención de los parámetros requeridos y necesarios que permitan modelar el pavimento rígido mediante un software de elementos finitos y por medio del mismo obtener la respuesta estructural en las condiciones en el que el pavimento cuente con soporte lateral y de la misma manera cuando no cuente con soporte lateral, posteriormente una vez realizado el modelado para las distintas condiciones se hará un análisis de la respuesta estructural en función a los esfuerzos y deflexiones teóricos que se obtengan como resultado del modelado.

1.9.2 Técnicas

En el desarrollo del proyecto se aplicarán inicialmente técnicas experimentales basadas en ensayos de laboratorio con la finalidad de caracterizar los materiales de la capa subbase y la subrasante. También será necesario la obtención de datos del diseño existente del tramo en estudio, de donde se retoman algunos parámetros con el fin de poder modelar la estructura, estos parámetros son los siguientes:

Tabla 2. Parámetros de las losas del pavimento existente

Parámetro	Unidad
Losa	
Módulo elástico	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	adimensional
Coefficiente de expansión térmica	/°C
Densidad	kg/m ³
Diámetro de barras de amarre	mm
Espaciamiento entre barras de amarre	m
Longitud de barras de amarre	m
Diámetro de barras pasajuntas (lisas)	mm
Espaciamiento entre pasajuntas	m
Longitud de barras pasajuntas	m
Sub base	
Módulo de elasticidad	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	adimensional
Sub rasante	
Módulo de reacción de la sub rasante	N/mm ³

Fuente: Elaboración propia.

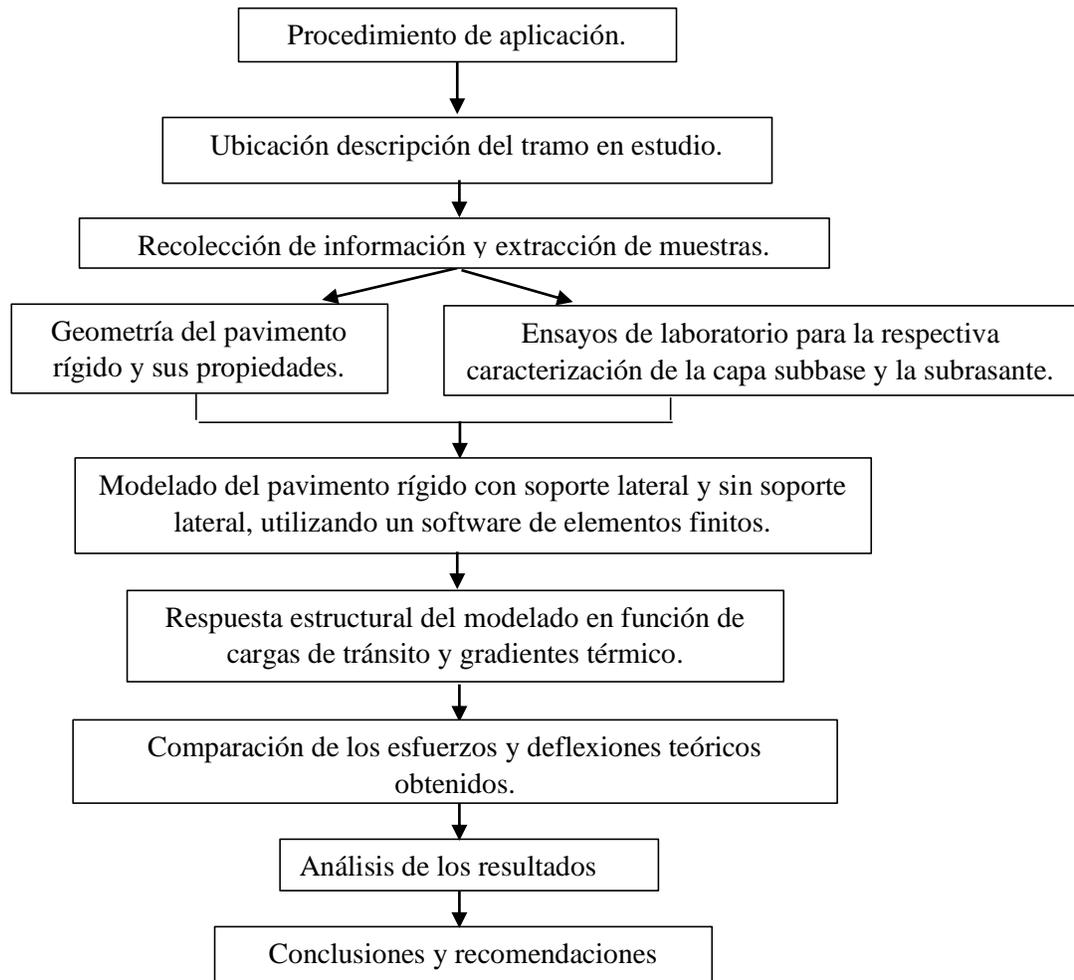
Finalmente, una vez reunida toda la información necesaria se empleará el uso del software EverFE 2.26, el cual nos permitirá modelar la estructura, todo este proceso se realizará por medio de una computadora que sea compatible con el programa.

Figura 1. Instrumentos requeridos para la modelación



Fuente: Elaboracion propia.

1.10 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN



1.11 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El presente proyecto se basa en el análisis comparativo desde el punto de vista de la respuesta estructural teórica, el efecto que la utilización de soporte lateral tiene sobre los pavimentos rígidos, para tener una base de comparación debe trabajarse con datos de un tramo de carretera ya existente por lo tanto en este caso, el tramo en estudio es el tramo Campo Pajoso – Caraparí.

Para ello se realizarán las actividades necesarias para lograr el objetivo del proyecto iniciando por la ubicación y las características del tramo en estudio, posteriormente se procederá a la determinación de los parámetros del pavimento como ser espesor y geometría de las losas, y para la caracterización de la subbase y subrasante se procederá a la toma de muestras de puntos específicos del tramo que serán analizadas en laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, también será necesario retomar algunos parámetros del diseño existente, una vez recabada la información y los datos necesarios se procederá a la modelación del pavimento.

Para efectuar la modelación se utilizará el software modelador EverFE 2.26 que para su simulación emplea la teoría de elementos finitos, que apoyándonos en su manual de utilización se realizará una combinación de variables que serán la posición de las cargas por eje de tránsito en las losas (en el borde, en la esquina), el gradiente térmico y la utilización de soporte lateral, para la creación de escenarios en el software que den como respuesta los esfuerzos y deflexiones teóricas del pavimento.

Los parámetros comparados en dicho estudio son: Esfuerzos máximos en losas bajo la acción de cargas de tránsito, deflexiones bajo la acción de cargas de tránsito, esfuerzos máximos y deflexiones bajo la acción del efecto combinado de cargas (cargas por eje y gradiente térmico).

También se realizará una descripción general del método de los elementos finitos con dirección a ser aplicado en la modelación del pavimento rígido.

Finalmente, de los resultados obtenidos se realizará un análisis y comparación basado en la respuesta estructural del pavimento ante las distintas condiciones simuladas, de tal análisis se establecerá las respectivas conclusiones y recomendaciones.

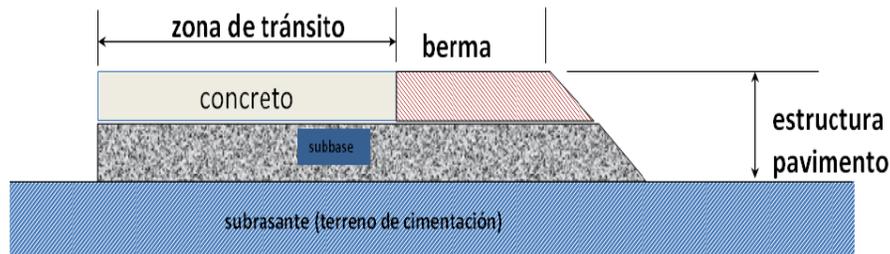
CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DEL PAVIMENTO RÍGIDO

2.1 GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

2.1.1 Definición de pavimento rígido

Figura 2. Partes del pavimento rígido



Fuente: Tópicos de Pavimentos de Concreto, Diseño, Construcción y Supervisión, Ing. Mario Becerra Salas 2012

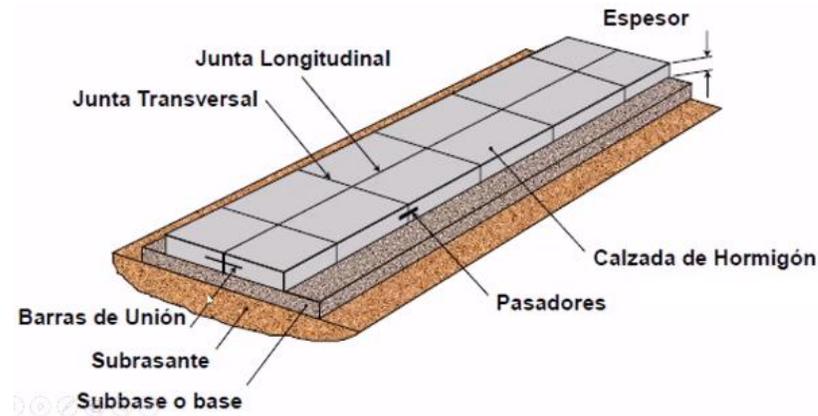
Son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina subbase del pavimento rígido. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico, así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además, como el concreto es capaz de resistir, en cierto grado, esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento. (Montejo Fonseca, 2002).

Los pavimentos de concreto reciben el apelativo de “rígidos” debido a la naturaleza de la losa de concreto que la constituye.

Los pavimentos rígidos, generalmente consisten de una subrasante subyacente, una capa de subbase y una losa de pavimento. La subbase puede ser estabilizada o sin estabilizar. En los casos de diseño de caminos con bajos volúmenes de tránsito, donde el tráfico de camiones es bajo, la capa de subbase puede no ser necesaria entre la subrasante y la losa del pavimento. (AASTHO, 1997).

2.1.2 Estructura de los pavimentos rígidos

Figura 3. Elementos típicos de un pavimento rígido



Fuente: Geotecnia y pavimentos, Santiago de Querétaro

2.1.2.1 Losa

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante, dado que no usan capa de base. En general, se puede indicar que el concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura de pavimento.

Los pavimentos pueden dividirse en tres tipos:

- **Concreto hidráulico simple**

No contiene armadura en la losa y el espaciamiento entre juntas es corto entre (2.50 a 4.50 m). Las juntas pueden o no tener dispositivos de transferencia de cargas (dovelas).

- **Concreto hidráulico reforzado**

Tienen espaciamientos mayores entre juntas y llevan armadura distribuida en la losa a efecto de controlar y mantener cerradas las fisuras de contracción.

- **Concreto hidráulico reforzado continuo**

Tiene armadura continua longitudinal y no tiene juntas transversales excepto juntas de construcción. La armadura transversal es opcional en este caso. Estos

pavimentos tienen más armadura que las juntas armadas y el objetivo de esta armadura es mantener un espaciamiento adecuado entre fisuras y que estas permanezcan cerradas.(Coronado Iturbide, 2002).

2.1.2.2 Sub base

La sub base es una estructura de pavimento rígido, consiste en una o más capas compactadas de material granular o estabilizado, colocado entre la sub rasante y la losa rígida con los siguientes propósitos:

- Para proporcionar uniformidad, estabilidad y soporte uniforme.
- Para incrementar el módulo k de reacción de la sub rasante.
- Para minimizar los efectos dañinos de la acción de las heladas.
- Para prevenir el bombeo de los suelos de granos finos en las juntas, grietas y bordes de las losas rígidas.(AASTHO, 1997).

La función más importante es impedir la acción del bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento. Se entiende por bombeo a la fluencia de material fino con agua fuera de la estructura del pavimento, debido a la infiltración de agua por las juntas de las losas. El agua que penetra a través de las juntas licúa el suelo fino de la sub rasante facilitando así su evacuación a la superficie bajo la presión ejercida por las cargas circulantes a través de las losas.(Montejo Fonseca, 2002).

2.1.2.3 Sub rasante

Es el terreno de cimentación del pavimento. Puede ser el suelo natural, debidamente recortado y compactado o puede ser, debido a los requerimientos del diseño geométrico, cuando el suelo natural es deficiente, y el material seleccionado de relleno es de buena calidad.(Salazar Rodriguez, 2015).

De la calidad de esta capa depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea éste flexible o rígido. Como parámetro de evaluación de esta capa se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas del tránsito. Es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen (hinchamiento - retracción). Los cambios de volumen de un suelo de sub rasante de tipo expansivo pueden ocasionar graves daños en las estructuras que se apoyen sobre éste, por

esta razón cuando se construya un pavimento sobre este tipo de suelos deberá tomarse la precaución de impedir las variaciones de humedad del suelo para lo cual habrá que pensar en la impermeabilización de la estructura. Otra forma de enfrentar este problema es mediante la estabilización de este tipo de suelo.

2.2 JUNTAS EN PAVIMENTO RÍGIDO

En las losas de un pavimento rígido se presentan diversas clases de esfuerzos. Los más elevados son los generados por la circulación de los vehículos sobre ellas, los cuales se controlan con el correcto diseño del espesor de las losas, con la selección adecuada de la resistencia del concreto y con una calidad en la construcción tal que las propiedades determinadas durante el diseño se cumplan.

Otros esfuerzos generados en el pavimento se deben a los movimientos de contracción o expansión del concreto y a las diferencias en la temperatura, o en la humedad, entre la superficie y el apoyo de la losa. Estos esfuerzos se controlan con una adecuada selección de las dimensiones superficiales de las losas, en otras palabras, diseñando las juntas del pavimento.

Las juntas, transversales y longitudinales, se construyen para impedir que se presente fisuración del pavimento. Además, los análisis de los esfuerzos generados en las losas, por cargas colocadas en diferentes posiciones, han demostrado que estos son mayores en las cercanías de los bordes de las losas y, aún más, en sus esquinas, de lo cual se concluye que las juntas inducen en el pavimento rígido unas zonas de debilidad relativa, por lo que en su concepción se deben diseñar los mecanismos o tomar las precauciones necesarias para mantener su integridad estructural.(Montejo Fonseca, 2002).

2.2.1 Tipos de juntas

- **Juntas transversales de contracción:** Son juntas construidas transversalmente al eje central de la vía y espaciadas para controlar la fisuración transversal de la losa. Se han realizado estudios que han demostrado que el espesor del pavimento, rigidez de la base y el clima afectan la máxima separación esperada entre juntas transversales.
- **Juntas transversales de construcción:** Son juntas construidas al final del día de trabajo u otra interrupción de colocado si se produce un lapso mayor a 60 minutos

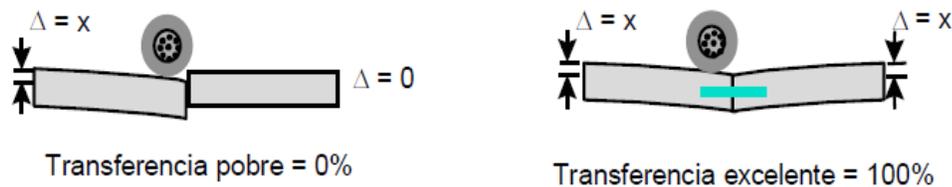
en clima cálido y 90 minutos en clima frío, este tiempo es medido desde la elaboración del hormigón hasta su puesta en obra y posterior acabado. Cuando es posible, estas juntas deben ser construidas coincidiendo con una junta de contracción, en el caso de que esto no sea posible, su ubicación deberá ser dentro del tercio medio de la longitud de la losa y siempre en forma perpendicular a la línea central.

- **Juntas longitudinales:** Son aquellas que van paralelas al eje central de la vía, controlan la fisuración y en algunos casos delimitan las líneas de tráfico. Cuando se realiza el vaciado en una sola pasada de dos o más carriles, la transferencia de carga generalmente se produce por la trabazón mecánica de los agregados que se origina en la junta después del corte, sin embargo, se recomienda además el colocado de barras corrugadas, diseñadas en base a las recomendaciones de la Guía de Diseño AASHTO o más fácilmente con el software DIPAV.
- **Juntas de separación y expansión:** Son construidas para permitir el movimiento de las losas sin dañar pavimentos adyacentes, intersección de calles, estructuras de drenaje, puentes y otras estructuras fijas.(IBCH, n.d.).

2.3 TRANSFERENCIA DE CARGAS

El concepto de transferencia de cargas en las juntas transversales, se refiere a la capacidad de una losa de transferir una parte de su carga a la losa vecina. De este modo, una junta con el 100% de transferencia de carga será aquella que transfiera la mitad de su carga a la losa vecina, reduciendo por tanto sus tensiones de borde según se muestra en la Figura:

Figura 4. Esquema representativo de transferencia de cargas



Fuente: Diseño de pavimentos AASHTO-93

Como puede apreciarse, para lograr una efectiva transferencia de cargas en sentido longitudinal, para tráficos pesados, especialmente en carreteras, se debe usar barras pasajuntas en todas las juntas transversales. En caso de no usarlas, lo cual es común en pavimentos urbanos de tráfico liviano, el sistema constructivo de vaciar todas las losas en una sola franja y cortar las juntas en aproximadamente $1/3$ del espesor de la losa, permite que se desarrolle una fricción entre agregados gruesos en la zona de contacto en las juntas, para lo cual se recomienda espaciamientos de juntas no muy grandes a fin de reducir la apertura entre las juntas, mejorando este tipo de transferencia de cargas al tener los agregados un mayor contacto.

Por otra parte, la capacidad de transferencia de cargas en el sentido transversal tiene una importante influencia desde el punto de vista del diseño, de manera que, en sentido transversal, el uso de bermas de hormigón atadas, o sobreanchos, tiene un efecto positivo en la reducción de esfuerzos en las losas. De acuerdo con estudios de deflexión elaborados por la American Concrete Pavement Association (ACPA), si se carga una losa sin barras pasajuntas en una esquina, se producirá una deflexión 5 veces mayor que si la carga se colocara en el centro de la losa. Esta misma deflexión sería 3 veces mayor si la esquina estuviera vinculada con la losa adyacente mediante barras pasajuntas. Este estudio muestra la importancia de utilizar sobreanchos y barras pasajuntas para tráficos pesados puesto que puede reducirse notablemente los esfuerzos de tensión en bordes y esquinas o bien optimizar el diseño reduciendo los espesores de diseño. (DIPAV-IBCH, 2006).

Para que se obtenga una transferencia de carga satisfactoria se puede recurrir a uno de los siguientes mecanismos:

- **Trabazón mecánica de los agregados**

Se alcanza a través de la fricción entre las caras irregulares de la fisura que se forma en el aserrado. El clima y la dureza de los agregados tienen un gran impacto en la eficiencia de la transferencia. Esto puede ser incrementado usando agregados angulares y durables. La eficiencia de la trabazón de agregados disminuye rápidamente cuando se aumenta el ancho de la fisura y la frecuencia de aplicación de cargas pesadas, al punto de que el desempeño del pavimento puede ser afectado, por ello son recomendables sólo en pavimentos urbanos que llevan un reducido volumen de camiones.

- **Dispositivos de transferencia o barras pasajuntas de acero liso**

Deben ser usadas en todas las rutas que llevan un volumen alto de camiones pesados. El propósito de las barras es el de transferir cargas a través de la junta, sin restringir movimientos producidos por la contracción y expansión del hormigón.

- **Subbases estabilizadas rígidas, que reduzcan el nivel de deflexión**

Han sido también usadas para aumentar la transferencia de carga.(IBCH, n.d.).

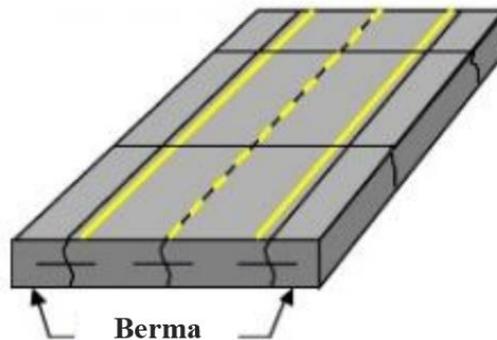
2.4 SOPORTE LATERAL

Los hombros amarrados a la losa de concreto hidráulico y a losas con sobreancho, pueden significativamente mejorar el comportamiento en un JPCP reduciendo las deflexiones críticas y los esfuerzos a lo largo de los costados. El tipo de hombro también afecta la cantidad de infiltración de humedad dentro de la estructura de pavimento.(NCHRP, 2004). Es el confinamiento que produce el soporte lateral y contribuye a reducir los esfuerzos máximos que se generan en el concreto por efecto de las cargas.

Un pavimento de concreto puede considerarse lateralmente soportado cuando tenga algunas de las siguientes características en su sección:(Hilton Arroyo, 2010).

- **Con berma**

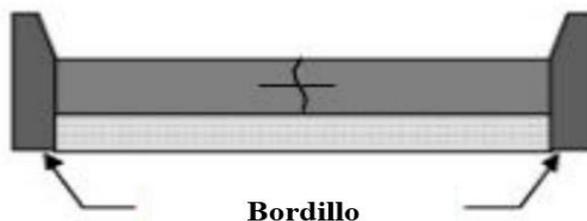
Figura 5. Pavimento de concreto con berma



Fuente: Geotecnia y pavimentos, Santiago de Querétaro

- **Confinamiento con guarniciones o bordillo**

Figura 6. Pavimento de concreto con bordillo



Fuente: Geotecnia y pavimentos, Santiago de Querétaro

2.4.1 Sobreancho

Las losas con sobreancho mejoran el comportamiento de un JPCP debido al movimiento efectivo de la trayectoria de la llanta lejos de los costados del pavimento donde ocurren las cargas más críticas.(NCHRP, 2004).

Las losas ensanchadas de concreto hidráulico han sido mostradas para ser un diseño efectivo. Como recomendación previa, el ensanchamiento máximo es de (60 cm) más allá de la faja del borde regular del carril. El ancho de la losa de concreto hidráulico para hombros no debería ser mayor que 14 pies (4 m) para minimizar la posibilidad de grietas longitudinales.(NCHRP, 2004).

2.4.2 Hombros

Además de servir como áreas de estacionamiento de emergencia, los hombros prestan soporte lateral al carril de la vía de la estructura de pavimento, provee un área de maniobras e incrementa la visibilidad sobre curvas horizontales.

Los hombros varían en ancho desde los dos pies (0.60 m) en caminos rurales hasta 12 pies (3.60 m) o más en carreteras donde pueden ser usados como vías de emergencias para el tráfico o durante el mantenimiento de vías regulares de tráfico.

Los hombros deben ser rasantes con la superficie de la vía y con el borde del carril de tráfico. Todos los hombros deben ser lo suficientemente inclinados para drenar el agua fuera de la vía. Los hombros de concreto asfáltico y de concreto hidráulico deben tener una inclinación del 2 al 6%, grava o piedra triturada del 4 al 6%.

Es aconsejable el uso de hombros pavimentados. Sin embargo, el costo adicional de este diseño no se puede garantizar en todos los proyectos. En estos casos, se ha dado una gran consideración el uso de hombros de carriles ensanchados. Esto reduciría

significativamente el esfuerzo en los bordes, esfuerzos de tensión y deflexiones. Esto incrementa la capacidad de acarrear cargas, seguridad y reduciría el costo de mantenimiento.

2.4.2.1 Recomendaciones para el diseño de hombros

2.4.2.1.1 Recomendaciones generales

- Los hombros deberían ser contruidos del mismo material de la estructura principal de pavimento para reducir problemas de mantenimiento sobre la junta con el hombro y la estructura principal.
- Deberían ser usados el mismo tipo de materiales y espesor general de base y sub base bajo los hombros y la estructura principal, especialmente altos volúmenes.
- Permitir el uso de agregado grueso para la base teniendo más del 6% menos de material en la malla N° 200 para proporcionar al menos una filtración suave de agua fuera de la base para minimizar el bombeo y el bloqueo del sistema de drenaje de hombros.
- Las autopistas en el área urbana y otras rutas en las que circulan altos volúmenes de vehículos, los hombros deberían ser contruidos de la misma sección estructural como la del pavimento principal para asegurarse de una adecuada capacidad de carga en la interface entre el pavimento y el hombro para prever facilidad y economía en la construcción, y así prevenir condiciones de empozamiento bajo el pavimento. Esto permitirá a los hombros ser usados como vías temporales durante los procesos de rehabilitación o reconstrucción.

2.4.2.1.2 Hombros de concreto hidráulico

- Como una opción para autopistas urbanas, puede ser considerado un hombro disminuido gradualmente. Adyacente a la estructura principal, las losas de pavimento hidráulico para hombros deberían ser del mismo espesor que la estructura principal de pavimento para permitir la colocación de las barras de amarre a la mitad del espesor de la losa y proporcionar soporte estructural a la invasión de las ruedas del vehículo.

- Los hombros de concreto deberían ser amarrados a la estructura principal con un apropiado espaciado y barras de amarre graduadas. El amarre del hombro de concreto mantiene firmemente a la junta y da una buena transferencia de carga el cual reducirá esfuerzos en el pavimento y deflexiones en los bordes. El amarre del hombro de concreto dará lugar a un mejor confinamiento, mayor facilidad para sellar la junta longitudinal el cual reducirá la filtración del agua a través de la estructura de pavimento. Las barras de amarre son necesarias entre la estructura de pavimento y los hombros para mantener la junta longitudinal firme y proveer la transferencia necesaria de carga y así evitar aberturas de juntas y problemas de seguridad.
- Los procesos de diseño tradicionales (Guía de Diseño AASHTO 1993) son inadecuadas en modelar esfuerzos y tensiones en barras de amarre. Por lo tanto, las recomendaciones para las barras de amarre deberían ser basadas en prácticas satisfactorias de agencias de tránsito. Las barras de amarre con un diámetro de 5/8 pulg. (16mm), son típicamente colocadas a cada 30 pulg. (75cm) con una profundidad de la mitad del espesor de la losa. Si las barras de amarre son dobladas por algún motivo necesario en el proceso de la construcción y luego son nuevamente enderezadas, es recomendado utilizar acero de grado 40 como la mejor opción para este proceso de doblado de las barras. Cuando se usa acero de grado 40, se deben usar barras de amarre de 5/8 pulg. (16mm), de diámetro por 30 pulg. (75cm) de longitud. Cuando se usa acero de grado 60, se deben usar barras de amarre de 5/8 pulg. (16mm) de diámetro por 40 pulg. (100cm) de longitud o 1/2 pulg. (12.5mm) de diámetro por 32 pulg. (80cm) de longitud. Algunas instituciones usan barras de 3/4 pulg. de diámetro con 30 pulg. (75cm) de espaciamiento para proporcionar la mejor capacidad de mantener la junta unida y una buena transferencia de carga para el tráfico pesado.
- Las barras de amarre no deberían ser colocadas dentro de 15 pulg. (40cm) de las juntas transversales. Cuando se usan barras de amarre mayores a las 32 pulg. (80cm) con juntas sesgadas (oblicuas), las barras de amarre no deberían estar colocadas dentro de 18 pulg. (45cm) de las juntas transversales.

- Otra opción es utilizar juntas con pernos de gancho cuando se construyen los machimbres. Algunas instituciones especifican dos piezas de barras de amarre roscadas para evitar la flexión de una barra. Una parte es molde dentro de la losa de concreto hidráulico y la otra parte se rosca en la primera parte después de pavimentar.
- Las juntas transversales de la estructura principal deberían ser extendidas continuamente a través del hombro. Todas las juntas transversales del hombro deben ser aserradas a una profundidad de un tercio del espesor de la losa.
- Cuando las juntas de los hombros de concreto son usados adyacentes a la estructura principal con refuerzo continuo, la junta del hombro debería ser aserrada a intervalos de cada 15 pies (4.5m). La junta simple del hombro no debería ser construida en forma íntegra con refuerzo continuo.(NCHRP, 2004).

2.4.3 Tipos de bermas según sus materiales

Los tipos de berma que se pueden emplear son:

- De concreto.
- De asfalto.
- Granulares.

El ancho de la berma es variable y depende de la importancia de la vía. La pendiente transversal de las bermas es mayor a la de la superficie del pavimento para permitir la adecuada evacuación de las aguas de lluvia.

En general, las bermas tienen una estructura de menor capacidad soporte que la calzada (pavimento), pero deben ser capaces de soportar cargas estáticas de vehículos pesados que ocasionalmente se estacionen sobre ellas.(Becerra salas, 2012).

2.5 DEFINICIÓN DE DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO

La “performance” o desempeño de un pavimento puede definirse como la capacidad estructural o funcional medible a lo largo de su período de diseño. El público usuario le asigna valores subjetivos de acuerdo a su calidad de rodadura, seguridad, aspecto y conveniencia.

La capacidad funcional comprende:

- Calidad aceptable de rodadura.
- Adecuada fricción superficial.
- Geometría apropiada para la seguridad vial.
- Apariencia (Estética).

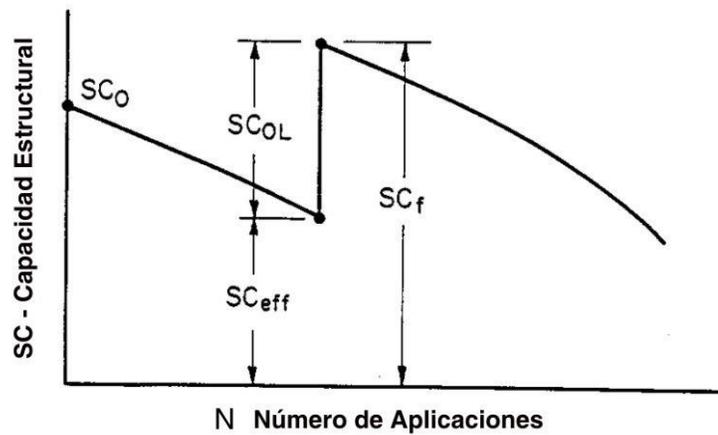
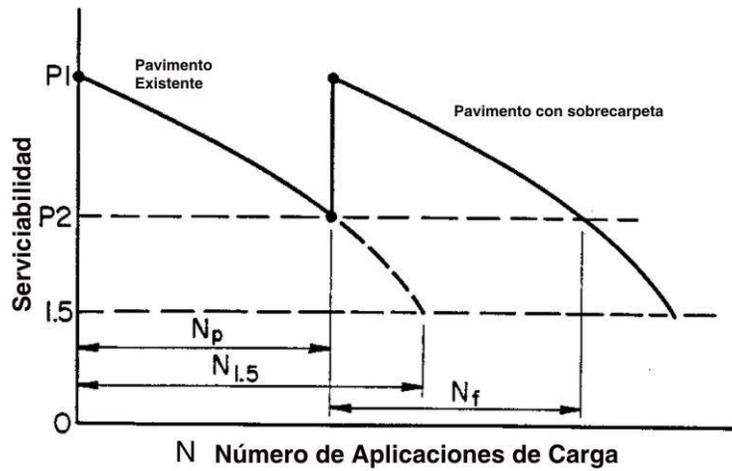
La capacidad estructural del pavimento implica soportar las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales.

La capacidad estructural y funcional están íntimamente relacionadas. En efecto, un deterioro estructural de un pavimento se manifiesta por una disminución de su capacidad funcional ya que hay un incremento en rugosidad, ruido y un riesgo para los vehículos y ocupantes que lo transiten. No obstante, hay otros tipos de fallas estructurales que pueden progresar sin que los usuarios lo noten hasta etapas muy avanzadas. También puede haber una pérdida de capacidad funcional sin que esto implique pérdida de capacidad estructural (ej. pérdida de resistencia a la fricción que se traduce en una vía resbaladiza). (DIPAV-IBCH, 2006).

2.5.1 Pérdida de la capacidad estructural

La capacidad estructural es esencialmente la medida de la habilidad de un pavimento de soportar cargas de tráfico repetitivas durante el tiempo. Para un pavimento nuevo, esta capacidad decrecerá con el tiempo y el deterioro de la estructura. En este entendido, para un pavimento con una capacidad estructural $SCol$, salvo cualquier rehabilitación mayor, el tiempo y las cargas de tráfico reducirán su capacidad a alguna capacidad estructural efectiva $SCef$, en el futuro. Esto se ilustra en el gráfico que se presenta a continuación donde el pavimento pasa de una serviciabilidad $P1$ a $P2$. (IBCH, 2005).

Figura 7. Pérdida de la capacidad estructural después del tiempo y tránsito



Fuente: Diseño de sobrecarpetas en pavimentos existentes (Aashto-93) IBCH

2.6 ESFUERZOS Y DEFLEXIONES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

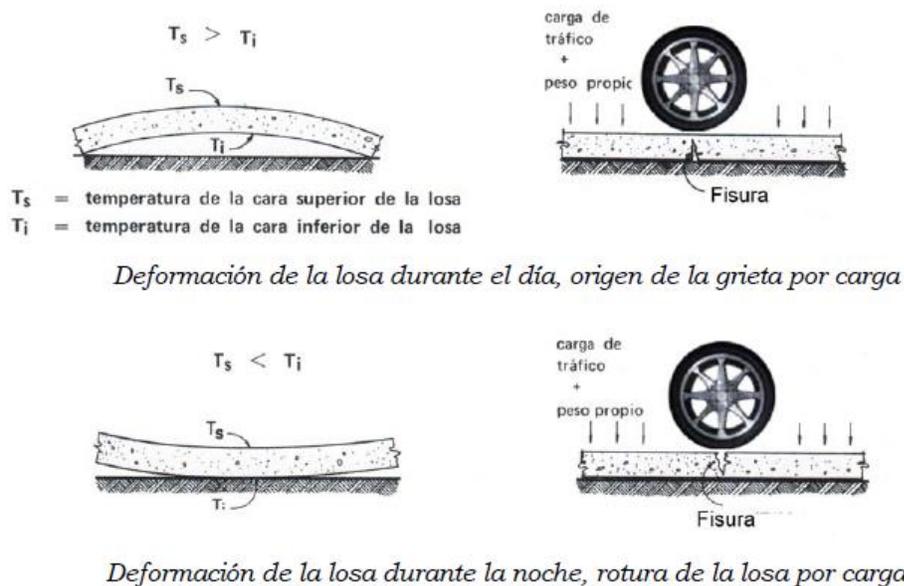
2.6.1 Esfuerzos debidos a cambios de temperatura

Durante el día, cuando la temperatura en la parte superior de la losa es mayor que en la inferior, la parte superior tiende a expandirse con respecto al eje neutro, mientras que la inferior tiende a contraerse. Sin embargo, el peso de la losa las restringe de la expansión y contracción; por lo que los esfuerzos de compresión son inducidos en la parte superior mientras los esfuerzos de tracción ocurren en la parte inferior. Durante la noche, cuando la temperatura en la parte superior de la losa es menor que en la parte inferior, la parte superior tiende a contraerse con respecto a la parte inferior; por lo tanto, los esfuerzos de tracción son inducidos en la parte superior y esfuerzos de compresión en la parte inferior.

Cuando la flexión ocurre en ambas direcciones, como en el caso de alabeo por temperatura, los esfuerzos en ambas direcciones deberán ser sumados para obtener el esfuerzo total. El esfuerzo máximo en una losa infinita debido al alabeo de temperatura puede ser obtenido asumiendo que la losa está completamente restringida en ambas direcciones.

Siendo Δt la temperatura diferencial entre la parte superior e inferior de la losa y α_t el coeficiente de expansión térmica del concreto. Si la losa tiene libertad de movimiento y la temperatura en la parte superior es mayor que en la parte inferior, la parte superior se expandirá con una deformación de $\alpha_t \Delta t/2$ y la parte inferior se contraerá con la misma deformación. Si la losa está completamente restringida evitando el movimiento, una deformación de compresión resultara en la parte superior y una deformación de tracción en la parte inferior.

Figura 8. Deformaciones debido al gradiente de temperatura

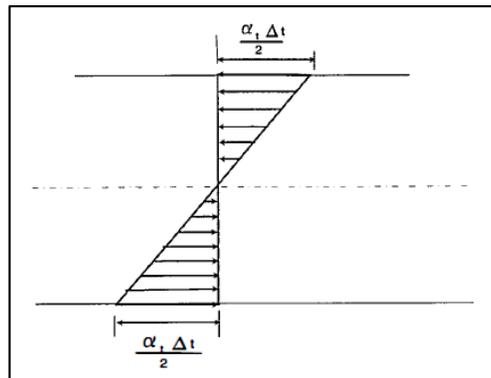


Fuente: Lineamientos generales para el diseño geométrico de juntas IBCH

Westergaard (1926) desarrolló ecuaciones para determinar los esfuerzos por alabeo en los pavimentos de concreto basado en la teoría de placas. Estos esfuerzos también pueden ser determinados a través de la ley de Hooke asumiendo deformaciones planas.(Menéndez Acurio, 2009).

En caso de considerar las flexiones en ambas direcciones, los esfuerzos deberán ser superpuestos. Los esfuerzos máximos por alabeo en una losa de longitud infinita corresponderán a la condición de restricción total de la losa, ver la siguiente figura.(Salazar Rodriguez, 2015).

Figura 9. Gradiente térmico de una losa de concreto



Fuente: Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos Ing. Aurelio Salazar Rodríguez

Llamando Δt al diferencial de temperatura entre el fondo y el lecho superior de la losa, y α_t el coeficiente de expansión térmica del concreto, si la losa es libre de moverse, y si además en la superficie la temperatura es mayor que en el fondo, entonces en la superficie habrá una expansión $\alpha_t \Delta t/2$. En el fondo, la contracción para comportamiento lineal sería de la misma cantidad.

Así el esfuerzo total en una dirección debido al alabeo de una losa en las dos direcciones en una placa de dimensión infinita y asumiendo una distribución lineal de la temperatura a través del espesor de la placa puede ser obtenido por la ecuación:

$$\sigma_x = \frac{E \times \alpha_t \times \Delta_t}{2 \times (1 - \nu^2)} \times (1 + \nu) = \frac{E \times \alpha_t \times \Delta_t}{2 \times (1 - \nu)} \quad (1)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del concreto (kg/cm^2)

α_t = Coeficiente de expansión térmica del concreto ($\text{mm/mm/}^\circ\text{C}$)

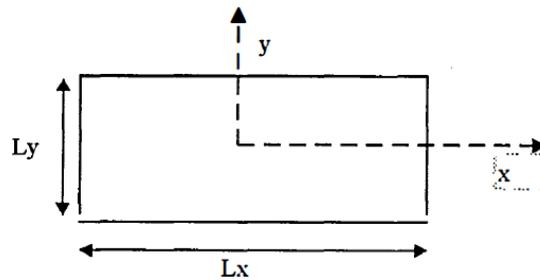
Δ_t = Diferencial de temperatura entre el fondo y el lecho superior de la losa ($^\circ\text{C}$)

ν = Módulo de poisson del concreto

Esfuerzo de alabeo en una losa finita

Para una losa de la geometría que se presenta en la siguiente figura, los esfuerzos totales en la dirección x se expresan como:

Figura 10. Esfuerzos en la dirección x



Fuente: Guía para el diseño y Construcción de pavimentos rígidos Ing. Aurelio Salazar Rodríguez

$$\sigma_x = \frac{C_x \times E \times \alpha_t \times \Delta_t}{2 \times (1 - \nu^2)} + \frac{C_y \times \nu \times E \times \alpha_t \times \Delta_t}{2 \times (1 - \nu^2)} = \frac{E \times \alpha_t \times \Delta_t}{2 \times (1 - \nu^2)} \times (C_x + \nu \times C_y) \quad (2)$$

Donde:

σ_x = Esfuerzos totales en la dirección x (kg/cm²)

Cx, Cy = Factores de corrección para losa finita

E = Módulo de elasticidad del concreto (kg/cm²)

α_t = Coeficiente de expansión térmica del concreto (mm/mm/°C)

Δ_t = Diferencial de temperatura entre el fondo y el lecho superior de la losa (°C)

ν = Módulo de poisson del concreto

En la ecuación (2) el primer término se debe a la flexión en la dirección x, mientras que el segundo se debe a la flexión actuante en la dirección y.

La ecuación para el esfuerzo por alabeo en la dirección y tiene la misma forma, solo variando subíndices. Los valores de Cx y de Cy son en función de la geometría y de las rigideces, Ly/l y Lx/l, en donde:

$$I = \left[\frac{E \times h^3}{12 \times (1 - \nu^2) \times k} \right]^{0,25} \quad (3)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del concreto (kg/cm²)

h = Espesor de la losa (cm)

ν = Módulo de poisson del concreto

k = Módulo de reacción de la capa de apoyo (kg/cm³)

La ecuación (3) es para un esfuerzo en la mitad de la losa; para las orillas, los esfuerzos son:

$$\sigma = \frac{C \times E \times \alpha_t \times \Delta_t}{2} \quad (4)$$

Donde:

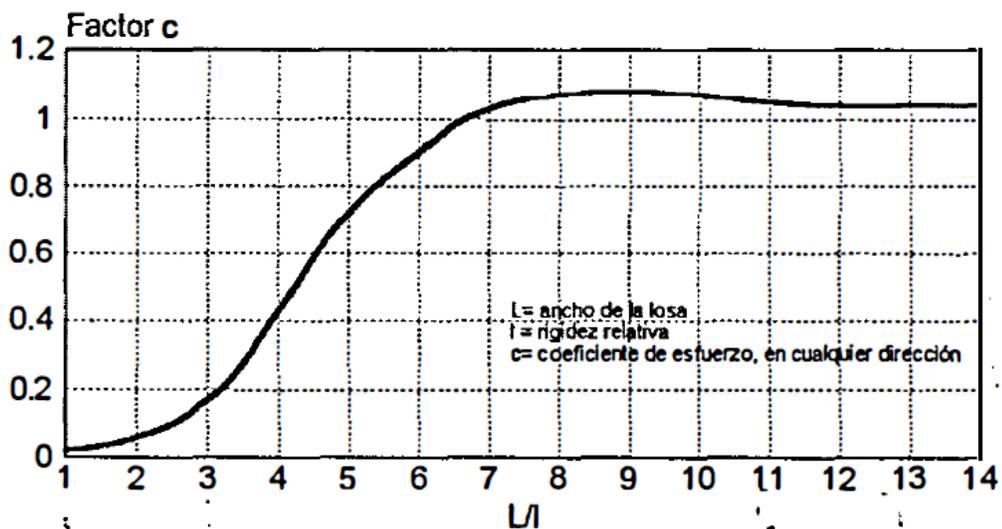
E = Módulo de elasticidad del concreto (kg/cm²)

ν = Módulo de poisson del concreto

C = Factor de corrección para losa finita

Δ_t = Diferencial de temperatura entre el fondo y el lecho superior de la losa (°C)

Figura 11. Factor correctivo para esfuerzos, caso de losa finita



Fuente: Guía para el diseño y Construcción de pavimentos rígidos Ing. Aurelio Salazar Rodríguez

Ahora σ puede ser σ_x o σ_y , dependiendo de si se utiliza C_x o C_y . El valor de C aumenta con la relación L/I , y es igual a 1.0 para $l=6,70 I$, y alcanza un valor máximo de 1,084 para $L=8,50 I$, después decrece hacia la unidad, conforme L/I tiende a infinito.

2.6.2 Esfuerzos y deformaciones debido a cargas

Se pueden usar tres métodos para determinar los esfuerzos y deflexiones en pavimento de concreto; formulas directas (cerradas), diagramas de influencia, y programas de elementos finitos para computadora.

Las formulas originalmente desarrolladas por Westergaard pueden ser aplicadas solamente a una carga de llanta simple con un área de contacto circular, semicircular, elíptica o semi-elíptica. Los diagramas de influencia desarrollados por Pickett y Ray pueden ser aplicados a cargas de llantas múltiples de cualquier configuración. Si las cargas son aplicadas a varias losas sobre cimentaciones liquidas, solidas o capas de fundación/cimentación con transferencia de carga a través de las juntas, entonces debería de usarse el método de elementos finitos.

La cimentación liquida asume que la subrasante es un conjunto de resortes independientes. La deflexión en cualquier punto determinado es proporcional a la fuerza en ese punto e independiente de las fuerzas sobre otros puntos. Se considera la Teoría de elementos finitos dado que este enfoque es más razonable si se habla de analizar una serie de capas apoyada en una superficie liquida o de Winkler.

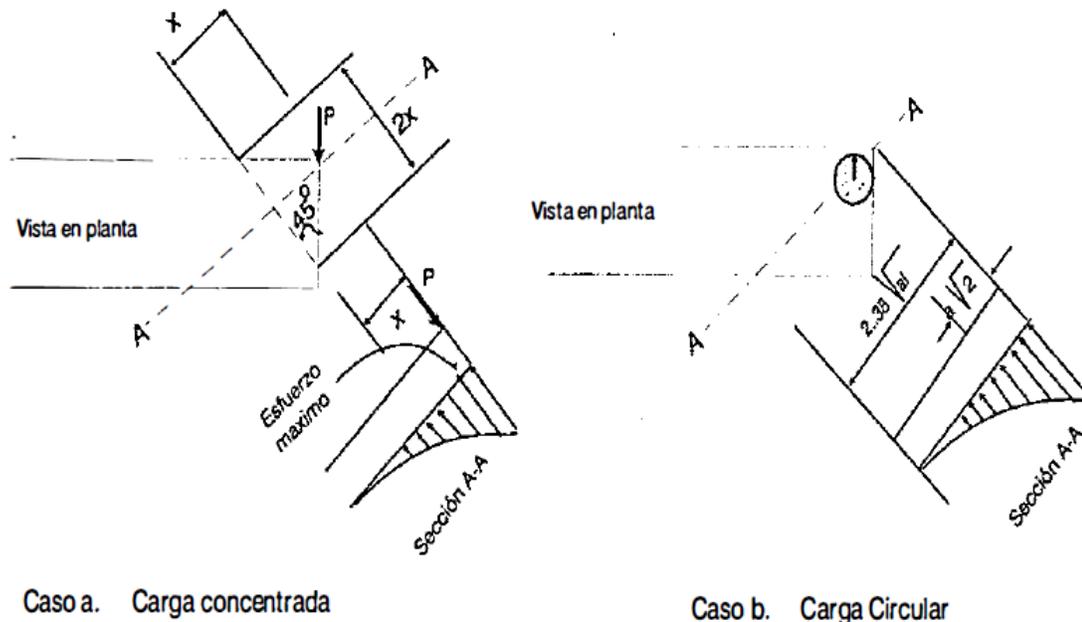
Soluciones Cerradas

Cargas en las esquinas

Se refiere a la acción de una carga concentrada en una esquina de la losa. Según se refiere en la siguiente figura, los esfuerzos respecto a una diagonal son simétricos.

En estas circunstancias, el momento en una sección situada a una distancia x respecto de la esquina será Px . El ancho de esta sección de corte es de $2x$. Despreciando la presencia de la capa de apoyo, el esfuerzo de tensión en la parte superior de la losa, sería:

Figura 12. Carga en una esquina de la losa



Fuente: Guía para el diseño y Construcción de pavimentos rígidos Ing. Aurelio Salazar Rodríguez

$$\sigma_c = \frac{Px}{\frac{1}{6}(2x)h^2} = \frac{3P}{h^2} \quad (5)$$

Donde:

σ_c = Esfuerzos debido a las cargas (kg/cm^2)

P = Carga concentrada (kg)

h = Espesor de la losa (cm)

Como se puede ver, según estas fórmulas los esfuerzos son independientes de la distancia x de la sección en la que se pretenda investigar el esfuerzo en el lecho superior de la losa. Dado que cuando x tiende a cero, es decir cuando se investiga el esfuerzo casi en la esquina, la influencia de la reacción de la capa de apoyo es prácticamente despreciable. Cuando la carga se hace más inferior, entonces la reacción hacia arriba se vuelve importante. Para el caso que la carga sea circular, de diámetro a , tal como aparece en la parte b de la figura anterior.

$$\sigma_c = \frac{3 \times P \times}{h^2} \times \left[1 - \left(\frac{a \times \sqrt{2}}{I} \right)^{0,6} \right] \quad (6)$$

$$\Delta_c = \frac{P}{k \times I^2} \times \left[1,1 - 0,88 \times \left(\frac{a \times \sqrt{2}}{I} \right) \right] \quad (7)$$

Donde:

σ_c = Esfuerzo debido a la carga en la esquina (kg/cm²)

Δ_c = Deflexión en la esquina (cm)

I = Radio de rigidez relativa

a = Radio del área de contacto (cm)

P = Carga aplicada (kg)

h = Espesor de la losa (cm)

k = Módulo de reacción de la subrasante (kg/cm³)

Las ecuaciones anteriores son iguales para el caso particular de que a=0, o sea carga concentrada.

Otros autores han encontrado valores diferentes para los esfuerzos y deflexiones al evaluar las fórmulas de Westergaard:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \times \left[1 - \left(\frac{C}{I} \right)^{0,72} \right] \quad (8)$$

$$\Delta_c = \frac{P}{k \times I^2} \times \left[1,205 - 0,69 \frac{C}{I} \right] \quad (9)$$

En las cuales C es la longitud del lado de un área de contacto cuadrada. Si la carga es aplicada sobre un área circular, el valor de C debe ser seleccionado de tal forma que el cuadrado y el círculo tengan la misma área de contacto, por lo tanto, C = 1.772 a.

Donde:

C = Longitud de un área de contacto cuadrada (cm)

σ_c = Esfuerzo debido a la carga en la esquina (kg/cm²)

Δ_c = Deflexión en la esquina (cm)

I = Radio de rigidez relativa

P = Carga aplicada (kg)

h = Espesor de la losa (cm)

k = Módulo de reacción de la subrasante (kg/cm³)

Carga al interior

Westergaard (1926) desarrolló las primeras formulaciones racionales para determinar los esfuerzos en el interior de las losas debidos a cargas con áreas circulares de radio a:

$$\sigma_i = \frac{3(1 + \nu)P}{2\pi h^2} \left[\ln\left(\frac{I}{b}\right) + 0,6159 \right] \quad (10)$$

Donde:

σ_i = Esfuerzo en el interior de la losa (kg/cm²)

I = Radio de rigidez relativa

P = Carga aplicada (kg)

ν = Módulo de poisson del concreto

a, b = Radio del área de contacto (cm)

$$b = a \quad \text{Cuando } a \geq 1,724 h$$

$$b = \sqrt{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \quad \text{cuando } a < 1,724 h \quad (11)$$

La deflexión total debido a una carga interior es:

$$\Delta_i = \frac{P}{8kI^2} \left[1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{a}{2I}\right) - 0,673 \right] \left(\frac{a}{I}\right)^2 \right] \quad (12)$$

Donde:

Δ_i = Deflexión total en el interior de la losa (cm)

I = Radio de rigidez relativa

P = Carga aplicada (kg)

ν = Módulo de poisson del concreto

a = Radio del área de contacto (cm)

k = Módulo de reacción de la subrasante (kg/cm³)

Carga en la borde

En 1948, Westergaard propuso las siguientes ecuaciones generales para determinar los esfuerzos y deflexiones producidos por cargas elípticas y semielípticas colocadas en las orillas.

Para el caso de áreas circulares, las acotaciones en los ejes mayores y menores de las elipses se hacen equivalentes a cargas de radios a :(Salazar Rodriguez, 2015).

$$\sigma_{e(Circulo)} = \frac{3(1 + \nu)P}{\pi(3 + \nu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 1,84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1 - \nu}{2} + \frac{1,18(1 + 2\nu)a}{I} \right] \quad (13)$$

$$\Delta_{e(Circulo)} = \frac{\sqrt{2 + 1,2\nu P}}{\sqrt{E \times h^3 k}} \left[1 - \frac{(0,76 + 0,4 \times \nu)a}{I} \right] \quad (14)$$

$$\sigma_{e(Semicirculo)} = \frac{3(1 + \nu)P}{\pi(3 + \nu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 3,84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{(1 + 2\nu)a}{2I} \right] \quad (15)$$

$$\Delta_{e(Semicirculo)} = \frac{\sqrt{2 + 1,2\nu P}}{\sqrt{Eh^3 k}} \left[1 - \frac{(0,323 + 0,17\nu)a}{I} \right] \quad (16)$$

Donde:

σ_i = Esfuerzo en el borde (kg/cm²)

Δ_c = Deflexión en el borde (cm)

I = Radio de rigidez relativa

a = Radio del área de contacto (cm)

P = Carga aplicada (kg)

h = Espesor de la losa (cm)

k = Módulo de reacción de la sub rasante (kg/cm³)

E = Módulo de elasticidad del concreto (kg/cm²)

ν = Módulo de poisson del concreto

2.6.3 Esfuerzos combinados

Aunque los esfuerzos de alabeo puedan ser grandes y hacer que se agriete el concreto cuando se combine con esfuerzos por carga, usualmente no se consideran en el diseño de espesor por las siguientes razones:

- Las juntas y el acero son usados para aliviar y prevenir los esfuerzos de alabeo. Los esfuerzos de alabeo se alivian cuando el concreto se agrieta. Grietas diminutas no afectaran la capacidad de carga de los pavimentos mientras se pueda mantener la transferencia de carga a través de las grietas.
- Cuando el principio de fatiga es usado en el diseño. No es tan practico combinar esfuerzos de alabeo y de carga. Un pavimento puede estar sujeto a millones de repeticiones durante el periodo de su diseño, pero el número de alteraciones de esfuerzos debido a alabeo es limitado.
- Si el diseño es regido por el esfuerzo de borde, los esfuerzos de alabeo deberían ser añadidos a los esfuerzos por carga durante el día, pero sustraídos durante la noche. Debido a este efecto compensatorio y al hecho de que gran número de camiones pesados son manejados durante la noche, puede que no sea critico el que los esfuerzos de alabeo sean ignorados.
- Se torna controversial el que se debería considerar o no al esfuerzo de alabeo en el diseño de pavimentos. La asociación de Cemento Portland (PCA) no considera el esfuerzo de alabeo en el análisis de fatiga. La experiencia pasada a demostrado que más grietas aparecen en losas más largas por que las losas más largas tienen esfuerzos de alabeo mayores que las losas cortas.(Menéndez Acurio, 2009).

2.7 MODELACIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

De manera general para modelar cualquier tipo de pavimentos ya sea flexible como rígido se parten de dos tipos de modelos, los de respuesta y los de comportamiento.

2.7.1 Los modelos de respuesta

Un modelo de respuesta es aquel modelo teórico del que se pueden extraer los valores de tensiones, deformaciones y desplazamientos de una estructura.

En el caso de los pavimentos rígidos existen modelos clásicos de respuesta entre los que se pueden mencionar el modelo de Westergaard, la teoría de las Capas Elásticas y recientemente, con el avance de las computadoras, aparece el Método de los Elementos Finitos (MEF).

2.7.2 Los modelos de comportamiento

Permiten prever cómo se comportará el pavimento a lo largo del tiempo teniendo en cuenta el efecto repetitivo de las cargas, estos modelos están principalmente asociados al fenómeno de la fatiga. Son por lo general fórmulas empíricas u obtenidas en laboratorios que posteriormente son calibradas por experiencia. Para estos casos no existen modelos universales, pues sus resultados dependen en gran medida de la práctica y las condiciones de cada país.(Hernández López et al., 2013).

Modelos mecanicistas

Las metodologías mecanicistas pretenden tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Esto es, un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen, y se pueden determinar en laboratorio o en campo. Esta metodología facilita la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y, por ende, aumentar en gran medida la confiabilidad de los diseños.

Las componentes de entrada al proceso de diseño se refieren a la geometría de la estructura; básicamente son los espesores de cada capa, las propiedades de los materiales que conforman cada una de esas capas, que serán módulos dinámicos o resilientes, el tipo de clima del medio físico que atravesará la carretera, definido por precipitación y temperatura, y el nivel de tránsito vehicular definido ya sea en ejes equivalentes, o preferentemente a través de su correspondiente espectro de distribución de cargas. La selección del diseño inicial consiste en una primera estimación de valores para esas componentes de entradas.

Definido el diseño inicial se procede al cálculo de lo que se va a llamar, las respuestas estructurales en la sección estructural del pavimento. Estas respuestas estructurales

consisten en conocer la distribución de esfuerzos (σ), deformaciones unitarias (ϵ), y deflexiones (δ).

Modelos empíricos

Los modelos empíricos tienen su origen en bases de datos reales conformadas a partir de pavimentos existentes, en dichas bases de datos se registran gran cantidad de información referida a diversos aspectos entre los que se cuentan: información general de los pavimentos, datos de diseño (materiales, diseño estructural, diseño de juntas, etc.), características del drenaje y de las bermas, datos de tránsito, de condiciones climáticas y de deterioros a lo largo de su vida útil.

Luego de determinar las variables más relevantes en la formación de cada deterioro, se realiza con ellas un análisis estadístico que da origen al modelo que predice el comportamiento futuro del pavimento, en base a una ecuación que relaciona las variables seleccionadas, en ciertos casos el modelo generado puede tener la desventaja de no ser aplicable a pavimentos en condiciones diferentes de aquellas en las que se tomaron los datos. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2011).

2.7.3 Modelos clásicos de respuesta en pavimentos rígidos

2.7.3.1 Solución analítica de Westergaard

Los primeros avances en el análisis de pavimento rígido empezaron en los años de 1920. En 1926, Westergaard obtuvo soluciones analíticas para las tensiones y las deflexiones debido a las variaciones de temperaturas y a las cargas del tráfico en pavimentos rígidos. El modelo de Westergaard difiere de otros modelos de respuesta por las hipótesis adoptadas. Estas, básicamente no coinciden con las otras en cuanto a la naturaleza de los materiales (elástica o viscoelástica), la tipología de las cargas, las condiciones de contacto entre capas (adherencia total, parcial o nula) y las condiciones de contorno.

2.7.3.2 Cartas de influencia

(Pickett and Ray 1951) desarrollaron cartas de influencia que permiten que las ecuaciones de Westergaard sean aplicadas a múltiples configuraciones de cargas. Estas soluciones

gráficas fueron enormemente simplificadas en la determinación de las desviaciones teóricas y los momentos causados por la carga sobre la losa. Las cartas de influencia fueron presentadas para cuatro tipos diferentes de aplicaciones de las cargas:

- Carga en el interior asumiendo la explanación como un líquido denso.
- Carga en el interior asumiendo la explanación como un sólido-elástico.
- Carga en el borde asumiendo la explanación como un líquido denso.
- Carga localizada a $l/2$, del borde asumiendo la explanación como un líquido denso.

2.7.3.3 Soluciones computarizadas

La solución es esencialmente una versión informatizada de las cartas de influencia de Pickett y Ray. El programa permite al usuario poner el neumático en diferentes orientaciones y posiciones para calcular la condición de tensión máxima.(Hernández López et al., 2013).

2.8 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de los elementos finitos, es un procedimiento basado en técnicas computacionales, que puede ser usado para analizar estructuras y diferentes sistemas continuos. Es un método numérico versátil, y que es ampliamente aplicado para resolver problemas que cubren casi todo el espectro de análisis ingenieriles. Sus aplicaciones comunes, incluyen el comportamiento de sistemas estáticos, dinámicos y térmicos. Los avances en el hardware, han facilitado y aumentado la eficiencia del software de elementos finitos, para la solución de sistemas complejos de ingeniería sobre computadores personales.

Si el objetivo del ingeniero, es el desarrollo de código de elementos finitos, entonces una profunda comprensión de la teoría de elementos finitos es esencial. Si el objetivo, es el uso del código de elementos finitos, entonces para el análisis es necesario tener:

- Básica comprensión de los conceptos fundamentales del método de los elementos finitos.

- Práctica incluyendo el conocimiento de las capacidades y limitaciones en el programa computacional que va a ser usado.

2.8.1 Descripción general del método de los elementos finitos

Calcular las deformaciones, tensiones y esfuerzos, con métodos clásicos de análisis, se logra a través de la solución manual de sus ecuaciones, y sus condiciones de frontera. El uso de métodos clásicos, es probablemente la mejor forma de analizar estructuras simples; no obstante, su uso es poco aconsejable cuando el sistema es complejo. En estos casos la mejor alternativa, es usualmente una solución obtenida con el método de los elementos finitos.

2.8.2 Pasos para el análisis de elementos finitos

Normalmente, el análisis de elementos finitos involucra siete pasos. Pasos 1,2,3,4,5,6 y 7 requieren decisiones realizadas por el usuario del programa de elementos finitos. El resto de los pasos son realizados automáticamente por el programa de computadora.

- **Discretización o modelado de la estructura**

La estructura es dividida en una cantidad finita de elementos, con ayuda de un preprocesador. Este paso es uno de los más cruciales para obtener una solución exacta del problema, de esta forma, determinar el tamaño o la cantidad de elementos en cierta área o volumen del elemento a analizar representa una ventaja del método, pero a la vez implica que el usuario debe estar muy consciente de esto para no generar cálculos innecesarios o soluciones erróneas.

- **Definir las propiedades del elemento**

En este paso el usuario debe definir las propiedades del elemento.

- **Ensamblar las matrices de rigidez de los elementos**

La matriz de rigidez de un elemento, consiste de coeficientes los cuales pueden ser derivados del equilibrio, residuos ponderados o métodos de energía. La matriz de rigidez del elemento se refiere a los desplazamientos nodales al ser aplicadas fuerzas en los nodos ($K \cdot F = U$). El ensamble de las matrices de rigidez, implica la aplicación de equilibrio para toda la estructura.

- **Aplicación de las cargas**

Fuerzas externas concentradas o fuerzas uniformes y momentos son especificados en este paso.

- **Definir las condiciones de frontera**

Las condiciones de apoyo deben ser dadas, por ejemplo, si el desplazamiento de ciertos nodos es conocido. Usando los elementos de la frontera se pueden determinar las reacciones en los mismos.

- **Solucionar el sistema de ecuaciones algebraicas lineales**

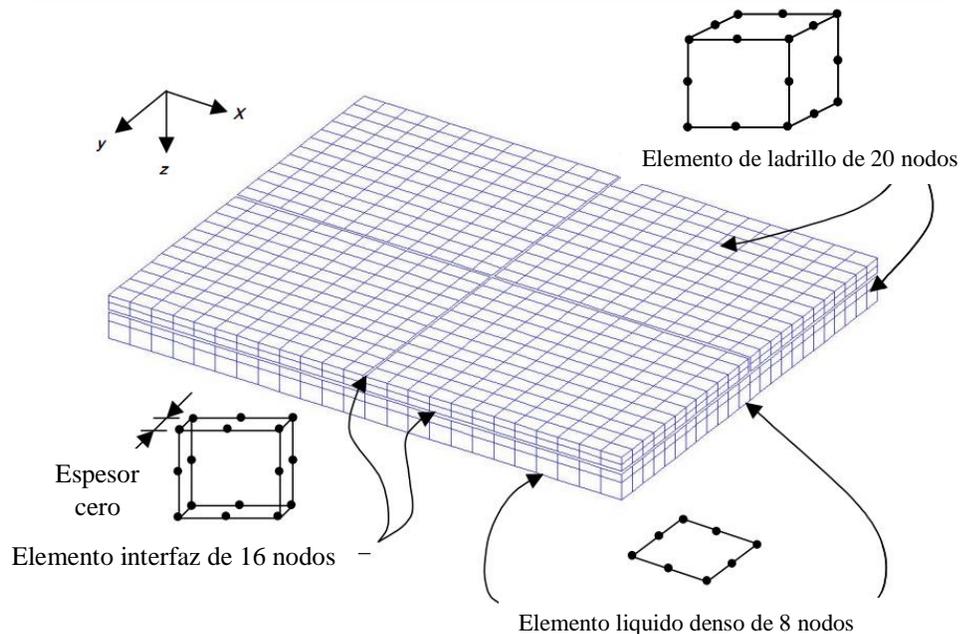
La secuencial aplicación de los pasos descritos, conduce a un sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas, donde los desplazamientos nodales son desconocidos.

- **Calcular los esfuerzos**

El usuario puede entonces calcular los esfuerzos, reacciones, deformaciones u otra información relevante. El post-procesador ayuda a visualizar la salida en forma gráfica.(Cubillos, n.d.).

2.8.3 Modelos de elementos finitos mediante EverFE 2.26

Figura 13. Discretización básica de elementos finitos



Fuente: Manual de teoría EverFE, Bill Davids, Universidad de Maine.

EverFE es una herramienta de análisis de elementos finitos en 3D para simular la respuesta de los sistemas de pavimento de hormigón articulado a cargas de eje y efectos ambientales. EverFE combina una interfaz gráfica de usuario altamente interactiva para el desarrollo de modelos y la visualización de resultados escritos en Tcl / Tk / Tix / v Tk con código de elementos finitos escrito en C ++ orientado a objetos.

Algunas características importantes de EverFE incluyen:

- La capacidad de modelar 1, 2 o 3 unidades de losas y / u hombros longitudinalmente y / o transversalmente (hasta un total de 9 unidades de losas-hombros en una configuración de 3x3). Las barras de unión transversales entre unidades de losas adyacentes se pueden modelar explícitamente.
- Se pueden especificar hasta tres capas de base elásticas con una base unida o no unida. La transferencia de corte de la base de la losa se puede capturar mediante una rigidez horizontal distribuida de plástico elástico entre las losas y la base. Una base líquida densa y sin tensión que soporta la tensión subyace en la capa más inferior del modelo.
- La transferencia de corte de enclavamiento de agregado lineal o no lineal se puede simular en juntas transversales.
- Las clavijas se pueden ubicar con precisión a través de las juntas transversales y modelar la holgura de las clavijas. En lugar de modelar la holgura de la espiga, se puede especificar un módulo de soporte de la espiga para modelar la interacción de la espiga.
- La desalineación y la mala ubicación de las espigas se pueden modelar.
- Se puede definir fácilmente una variedad de configuraciones de eje diferentes con una cantidad mínima de entrada.
- Se pueden capturar gradientes térmicos lineales, bilineales y trilineales a través del espesor de la losa. Esto permite la simulación de efectos térmicos, así como la contracción de la losa.
- Las amplias capacidades de postprocesamiento de EverFE permiten la visualización de tensiones, desplazamientos y fuerzas y momentos internos de las espigas. Los valores críticos de respuesta en cualquier punto del modelo se pueden recuperar fácilmente.(Davids, 2003).

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1 UBICACIÓN DEL TRAMO

El tramo de aplicación del presente proyecto corresponde al tramo carretero Campo Pajoso - Caraparí, el cual está ubicado en el departamento de Tarija, provincia Gran Chaco, cuenta con una longitud de 20 km iniciando desde la comunidad de Campo Pajoso.

La comunidad de Campo Pajoso, pertenece al distrito rural N°8 del municipio de Yacuiba forma parte de la primera sección de la provincia Gran Chaco. La distancia entre Campo Pajoso y Yacuiba es de 11 km y con respecto a Tarija la distancia es 225 km aproximadamente.

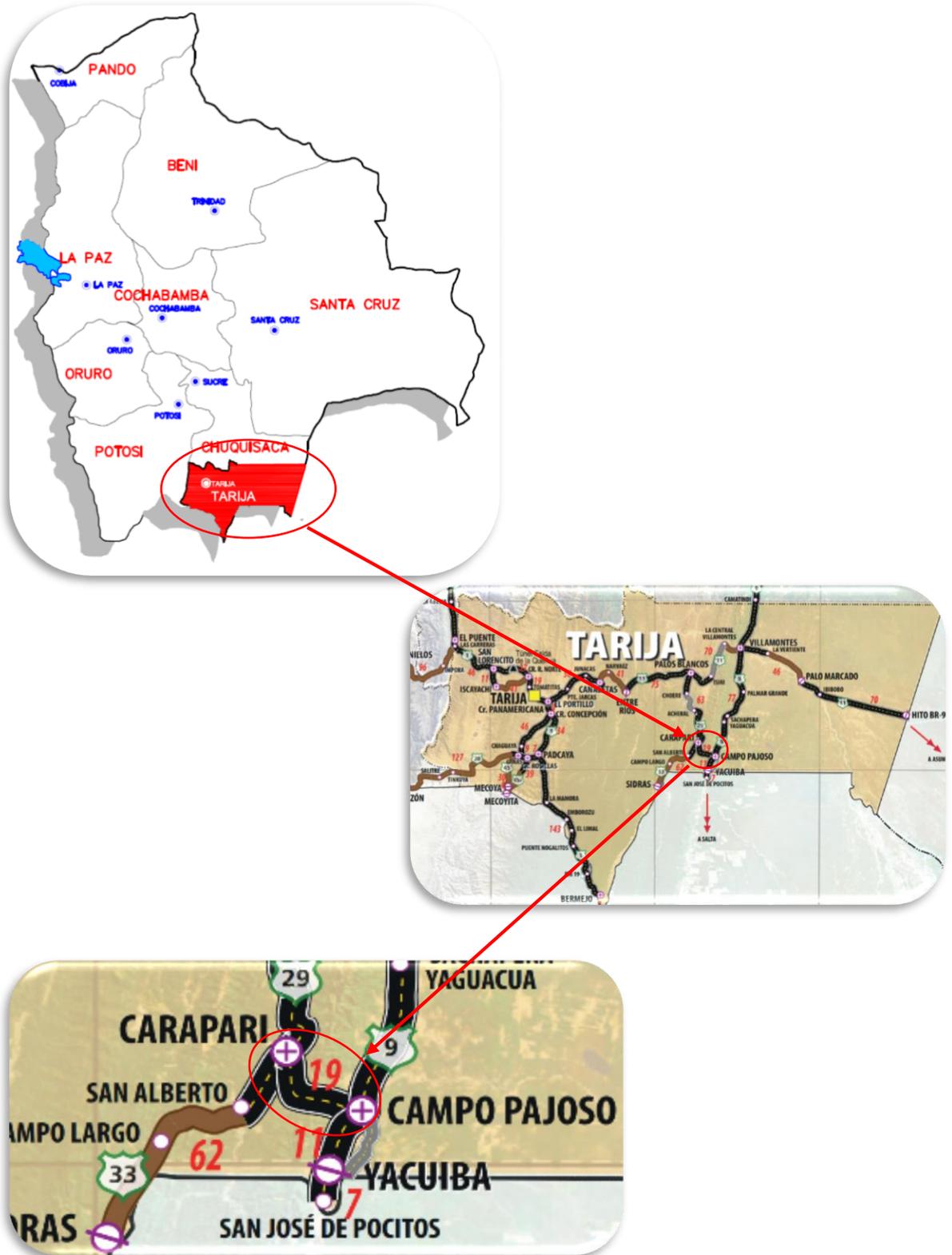
El Municipio de Caraparí, se ubica en la segunda sección de la provincia Gran Chaco del departamento de Tarija. El acceso al municipio de Caraparí, es accidentado, sin embargo, la comunicación entre Caraparí y el resto del departamento se realiza sin interrupciones a través de la ruta internacional Tarija – Yacuiba.

Tabla 3. Límites territoriales de Campo Pajoso y Caraparí

Municipio	Norte	Sur	Este	Oeste
Campo Pajoso	Municipio de Villa Montes, en el límite natural del río Pilcomayo.	Área urbana de Yacuiba – república Argentina.	Municipio de Villa Montes, en el límite natural del río Pilcomayo.	Con el municipio de Caraparí, confluyente con el límite natural de la serranía del Aguaragüe.
Caraparí	Municipio de Villa Montes y la provincia O'Connor.	Municipio de Padcaya y la República de Argentina.	Municipio de Yacuiba, municipio de Villa Montes y la república de Argentina.	Provincia O'Connor, municipio de Entre Ríos.

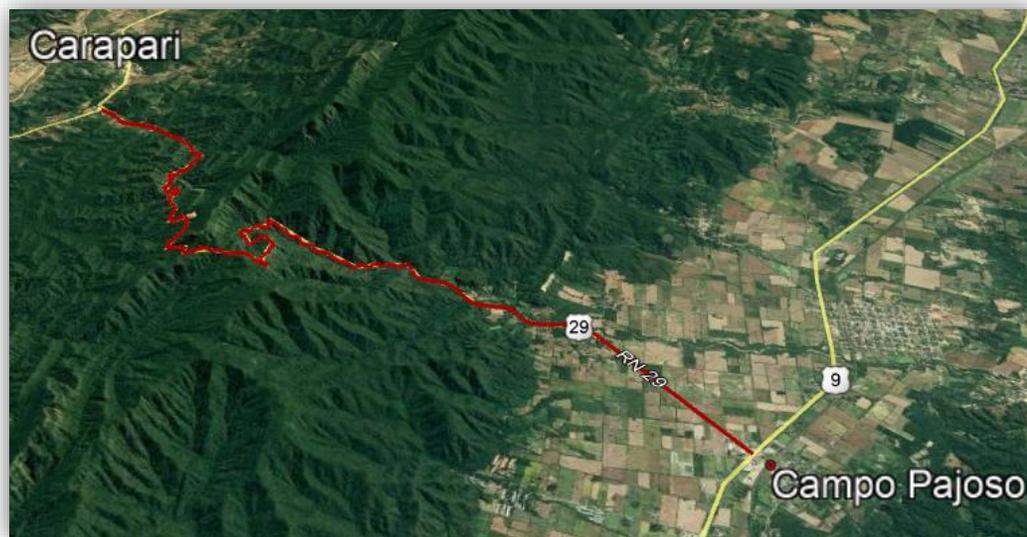
Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Croquis de ubicación del tramo en estudio



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Vista satelital del tramo campo Pajoso – Caraparí



Fuente: Google Earth

Tabla 4. Coordenadas de campo Pajoso y Caraparí

Coordenadas	Coordenadas UTM			Coordenadas geográficas	
	Este	Norte	Zona	Latitud	Longitud
Campo Pajoso	434501.95	7577721.95	20 Sur	21°54'12.53"	63°38'2.81"
Caraparí	424463.72	7585253.14	20 Sur	21°50'6.12"	63°43'51.37"

Fuente: Elaboración propia.

3.2 CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO EN ESTUDIO

El tramo campo Pajoso – Caraparí (Ruta F029) es perteneciente a la red vial fundamental. Por tanto, la Administradora Boliviana de Carreteras, es la autoridad competente encargada del mismo. Este tramo está constituido por pavimento rígido desde la progresiva 0+000 hasta la progresiva 7+200, en adelante la superficie de rodadura pasa a ser un afirmado superficial de grava desarrollándose este por toda la serranía del Aguarague, hasta la progresiva 16+000 en este tramo de afirmado superficial se tiene contemplado la construcción de un túnel denominado túnel del Aguarague, y desde la progresiva 16+000 en adelante la calzada es de pavimento rígido nuevamente hasta

culminar con el tramo, en la siguiente tabla se muestra un resumen de los tipos de rodadura presentes en el tramo Campo Pajoso – Caraparí

Tabla 5. Tipos de rodadura en el tramo Campo Pajoso - Caraparí

Progresiva	Tipo de rodadura
0 + 000 - 7 +200	Losas de hormigón con acero de refuerzo
7 + 200 - 16 + 000	Afirmado superficial
16 + 000 - 20+ 000	Losas de hormigón con acero de refuerzo

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, podemos especificar que se tienen dos tipos de pavimentos en el tramo, el de afirmado superficial y el de losas de hormigón con acero de refuerzo, siendo este último el cual se analizara debido a que el software de elementos finitos EverFE 2.26 para modelar requiere que el pavimento este construido específicamente de hormigón.

Se tiene dos secciones típicas de pavimento rígido en el tramo de estudio, las cuales están en función a la topografía, de acuerdo al trazado del tramo este atraviesa terrenos de baja pendiente en los primeros 2.42 km, seguidamente se presentan terrenos ondulados hasta la progresiva 5+260, y luego ingresa en topografía montañosa de la serranía de Aguaragüe a partir de esta progresiva hasta el km 17, en adelante se tienen terrenos ondulados hasta culminar con el tramo.

Tabla 6. Topografía del tramo en estudio

TRAMO	TOPOGRAFÍA	PROGRESIVAS	
		Desde	Hasta
Campo Pajoso - Caraparí	Plana	0+000	2+420
	Ondulada	2+420	5+260
		17+000	20+000
Montañosa	5+260	17+000	

Fuente: Diseño Final, Asfaltado tramo vial “Campo Pajoso – Caraparí – Palos Blancos”
 Para los terrenos planos y ondulados la sección típica de las losas es de 3 x 1.95, donde se tiene un ancho de carril de 3.5 m y una berma de 2 m, dicha berma está construida con dos tipos de superficie de rodadura, es decir que los primeros 40 cm de ancho de berma es de hormigón el cual esta adherido a las losas y los 1,60 m restantes de berma es de tratamiento superficial, conformando así un ancho de plataforma de 11 m. Esta sección está construida desde el inicio del tramo en el cruce con la ruta 9 hasta la progresiva 5+800. Durante las mediciones realizadas en campo se observó que en la progresiva 18+000,

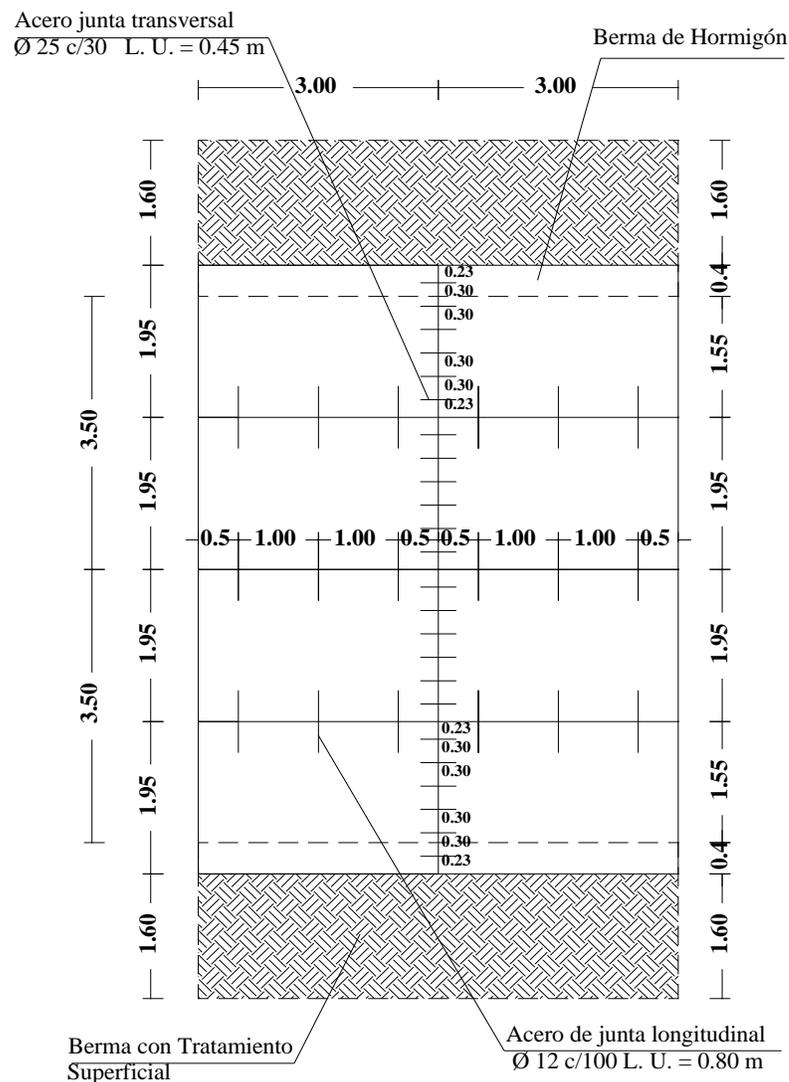
pertenciente a terrenos ondulados dicha sección típica no cuenta con la parte de berma de tratamiento superficial, teniéndose un ancho de plataforma de 7.80 m.

La segunda sección típica se presenta en los tramos montañosos, conformada por losas de 3 x 2.5, el ancho de carril de igual manera es de 3.5 m y se presenta una berma de 1.5 m construida con el mismo material que el de las losas.

En cuanto al paquete estructural para ambas secciones están construidas con losas de hormigón con acero de refuerzo (barras de amarre, barras pasajuntas), una capa sub base y subrasante.

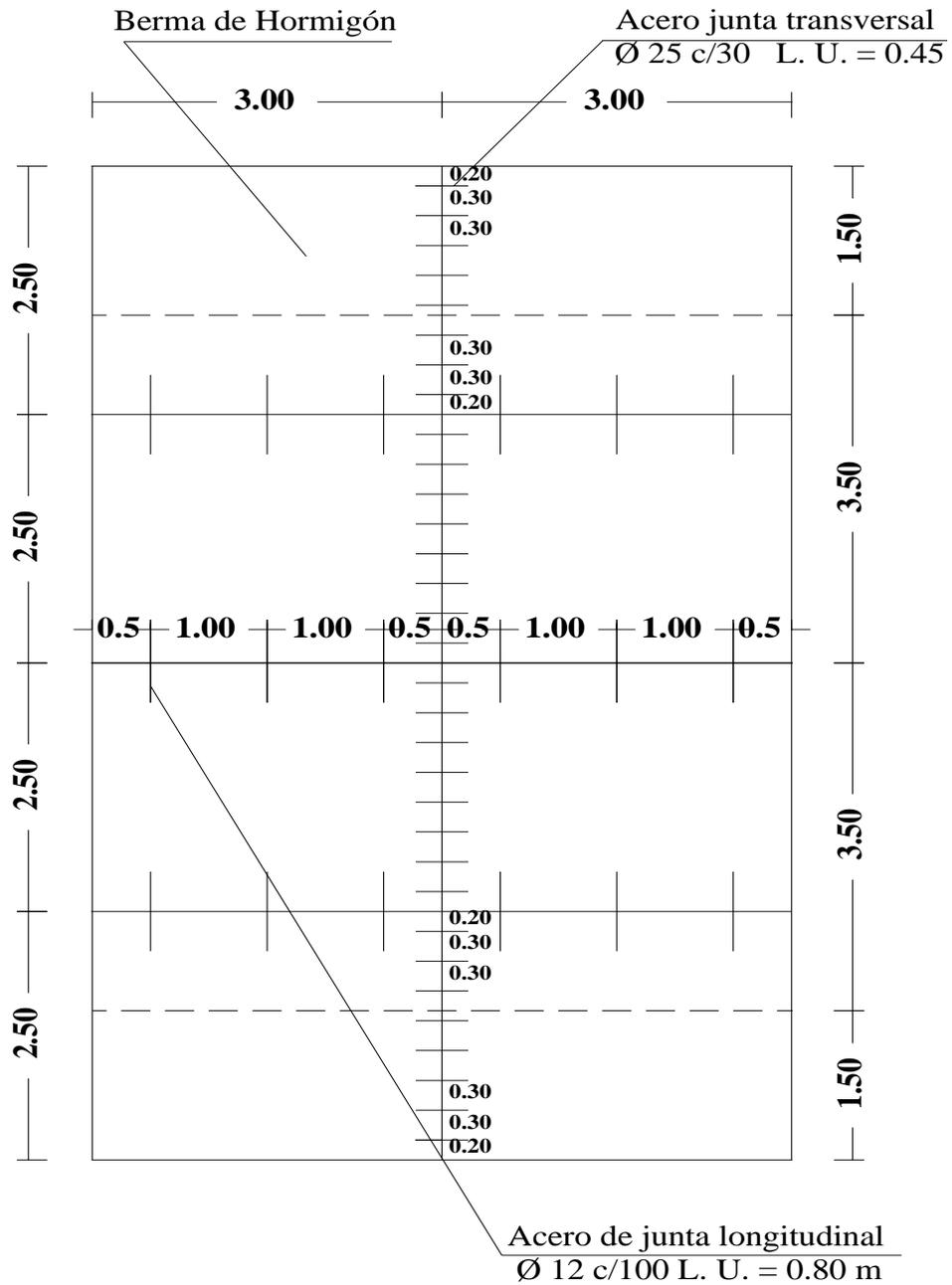
En las siguientes figuras se muestran detalladamente las secciones típicas del pavimento para los tramos planos, ondulados y montañosos respectivamente.

Figura 16. Sección típica terrenos planos y ondulados



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Sección típica terrenos montañosos



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Caracterización de los materiales

3.2.1.1 Criterios para la obtención de muestras en campo

Los procedimientos de muestreo son las técnicas que se aplican para obtener muestras de suelo, alteradas o inalteradas durante una exploración del suelo.

- **Muestra alterada.** - Una muestra alterada se define como aquella donde parte de ella o toda, ha sufrido una alteración tal, que ha perdido la estructura que poseía in-situ.
- **Muestra inalterada.** - Es aquella muestra que preserva, en la medida de lo posible, la estructura y el contenido de humedad para que represente realmente las condiciones de campo.

En el presente proyecto, las muestras con la que se trabajan son de tipo alteradas debido a que los ensayos que se realizan son de tipo identificativo, para esto se someten a estudios de caracterización mediante el cual se determinan sus propiedades físicas y mecánicas de la sub rasante y la capa sub base.

3.2.2 Proceso de recolección de datos

3.2.2.1 Trabajo de campo

En esta etapa se realizó la ejecución de excavaciones en cinco puntos del tramo denominados (P₁, P₂, P₃, P₄, y P₅), de las cuales se obtuvo muestras alteradas, para realizar los respectivos ensayos en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Juan Misael Saracho. Estas muestras fueron extraídas de las progresivas 6+000, 7+000, 16+000, 17+000 y 18+000.

Los motivos de la selección de estos puntos de extracción de muestras y mediciones se dan debido a que inicialmente en el sub tramo 0+000 hasta 5+800 existe la limitación de no poder extraer muestras del costado de la carretera por la presencia de bermas con tratamiento superficial en ambos lados de la calzada, por ello se avanzó más adelante entrando a terrenos montañosos donde la sección cambia y ya no existe la presencia de bermas con tratamiento superficial, permitiendo así extraer muestras del lado izquierdo de la carretera en las progresivas 6+000 y 7+000 aclarando que del lado derecho se encuentra además de las cunetas, la serranía del Aguarague. Luego se tiene en cuenta que en adelante y desarrollándose por toda la serranía la estructura de pavimento es de afirmado superficial por lo tanto este sub tramo no fue considerado para el análisis.

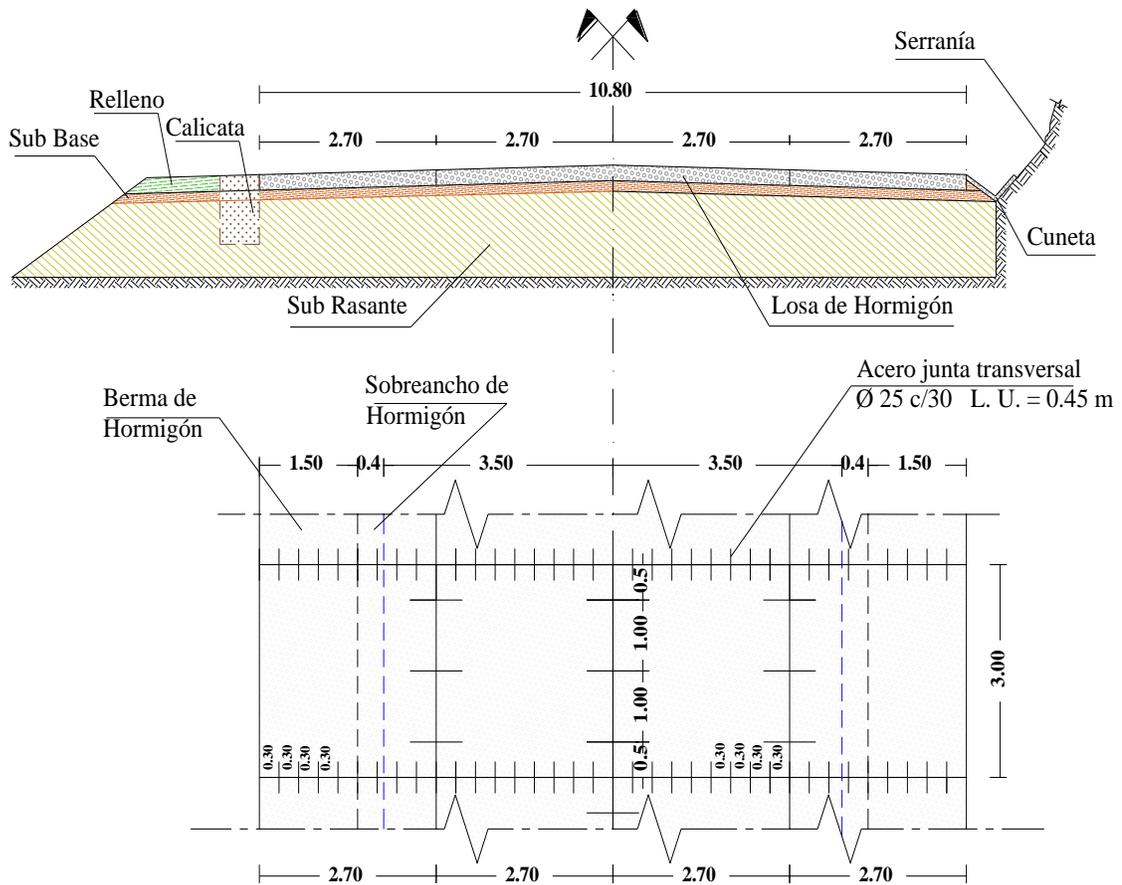
Continuando desde el km 16 en adelante la estructura de pavimento nuevamente está conformada por losas de hormigón hasta culminar con el tramo Campo Pajoso – Caraparí, es en este sub tramo donde se definió los puntos de estudio en las progresivas 16+000,

17+000 y 18,000 y se obtuvieron muestras del lado derecho porque en dichos puntos la serranía y cunetas están al costado izquierdo.

Las mediciones realizadas en campo y características del pavimento en cada punto de estudio se describirán a continuación:

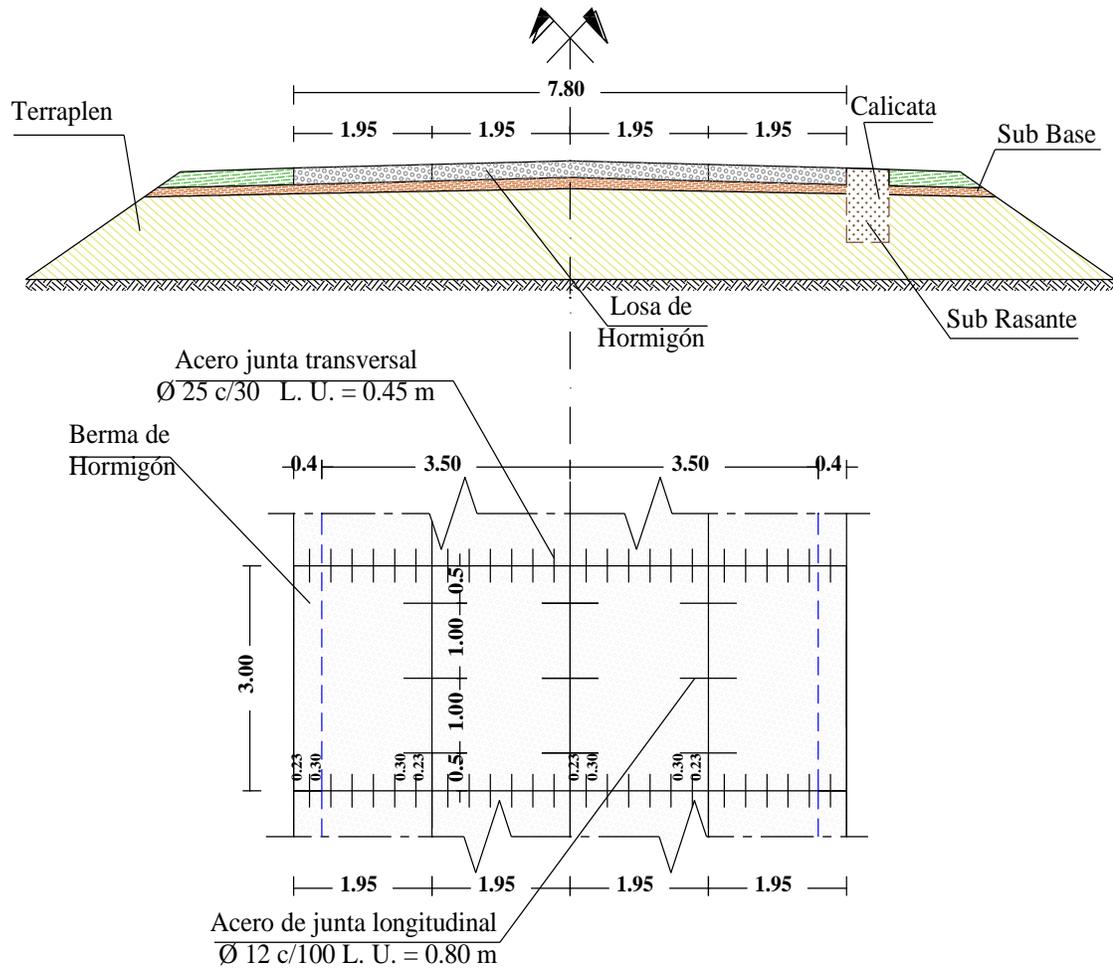
De acuerdo a las mediciones realizadas en la progresiva 6+000 se tiene un ancho de plataforma de 10.80 m, este forma parte de un tramo curvo donde se presenta un sobrecancho de 40 cm y una berma de 1.50 m, las dimensiones de las losas son de 3.00 x 2.70, como ya se mencionó la calicata se la realizó al lado izquierdo a una profundidad de 1 m, el espesor de las losas es de 22 cm y de la sub base 15 cm.

Figura 18. Vista en planta y sección transversal del pavimento en la progresiva 6+000



Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Vista en planta y sección transversal del pavimento en la progresiva 18+000



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan imágenes del proceso de extracción de muestras.

Figura 22. Extracción de muestras en campo





Fuente: Eelaboración propia.

Tabla 7. Coordenadas de los puntos de extracción de muestras

Punto	Progresiva	Coordenadas UTM			Coordenadas cartesianas	
		Norte	Este	Zona	Latitud	Longitud
P ₁	6+000	7580552.13	429765.87	20 sur	21°52'39.80"S	63°40'47.40"O
P ₂	7+000	7580510.25	428910.39	20 sur	21°52'41.04"S	63°41'17.21"O
P ₃	16+000	7582367.30	426349.86	20 sur	21°51'40.26"S	63°42'46.13"O
P ₄	17+000	7583078.72	426110.55	20 sur	21°51'17.09"S	63°42'54.36"O
P ₅	18+000	7583573.04	425249.94	20 sur	21°51'00.88"S	63°43'24.26"O

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.2 Trabajo de laboratorio de mecánica de suelos

Los ensayos que se realizaron en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, fueron los siguientes:

- **Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422; AASHTO T88)**

El análisis granulométrico consiste en pasar el suelo por una serie de tamices, previo conocimiento del peso total de la muestra seca, la parte del suelo retenido por cada tamiz se calcula en forma individual con relación al peso total y seguidamente se determina los porcentajes que pasan por cada tamiz.

Este ensayo tiene por objeto determinar la granulometría de los agregados hasta el tamiz N° 200, mediante su división y separación con una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente.

Figura 23. Esquema de la práctica de granulometría



Fuente: Elaboración propia.

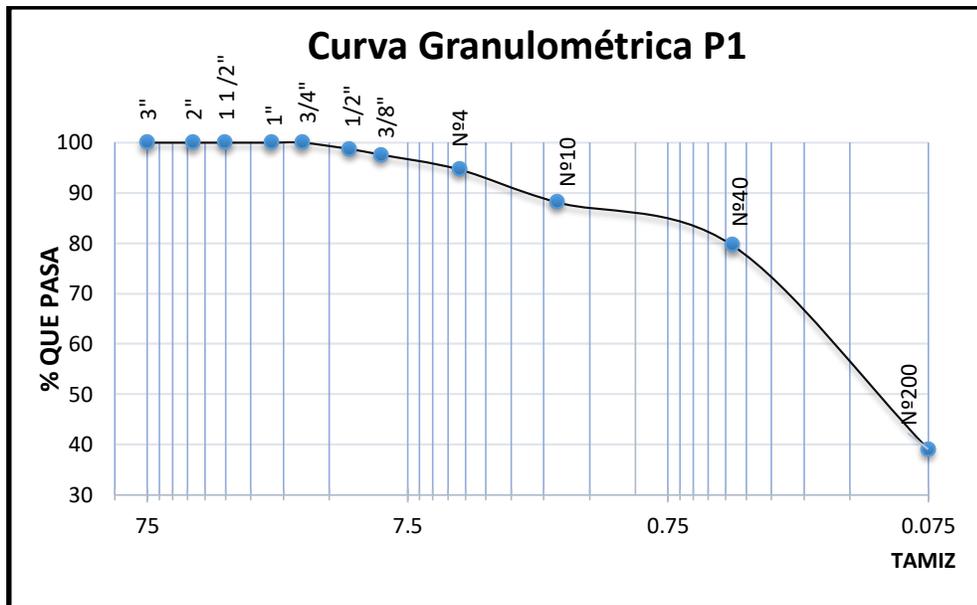
Resumen de resultados del análisis granulométrico de la sub rasante y la sub base

Tabla 8. Resultados de análisis granulométrico de la sub rasante

Granulometría de la sub rasante					
Punto	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Tamiz	% Que pasa del total				
3"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	98.72	100.00	100.00	100.00	100.00
3/8"	97.60	98.84	100.00	100.00	100.00
Nº4	94.67	94.93	96.98	95.77	99.26
Nº10	88.15	90.60	93.56	90.46	97.61
Nº40	79.63	82.73	86.29	85.62	94.69
Nº200	39.12	46.40	52.88	62.09	57.30

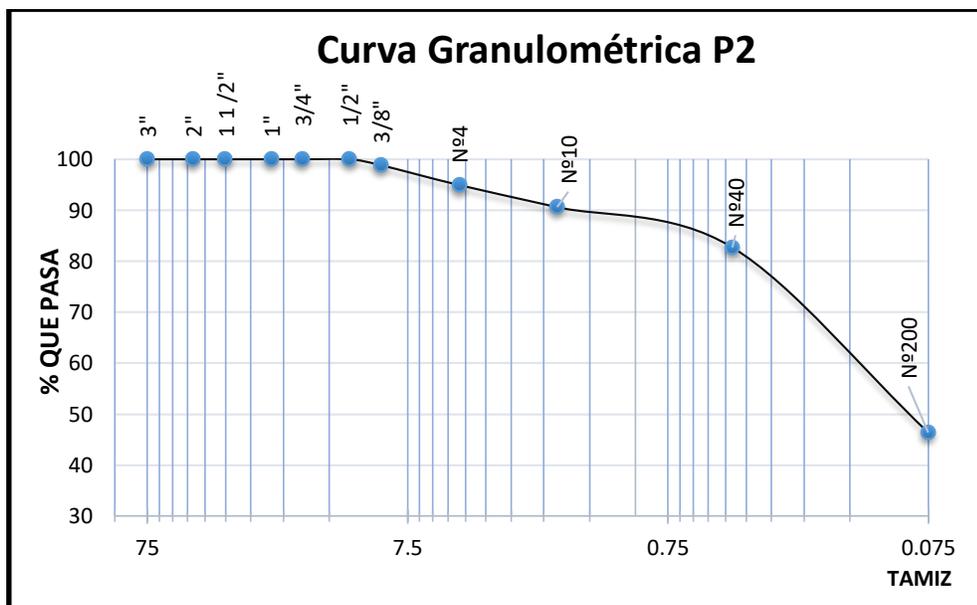
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 1. Curva granulométrica sub rasante P₁



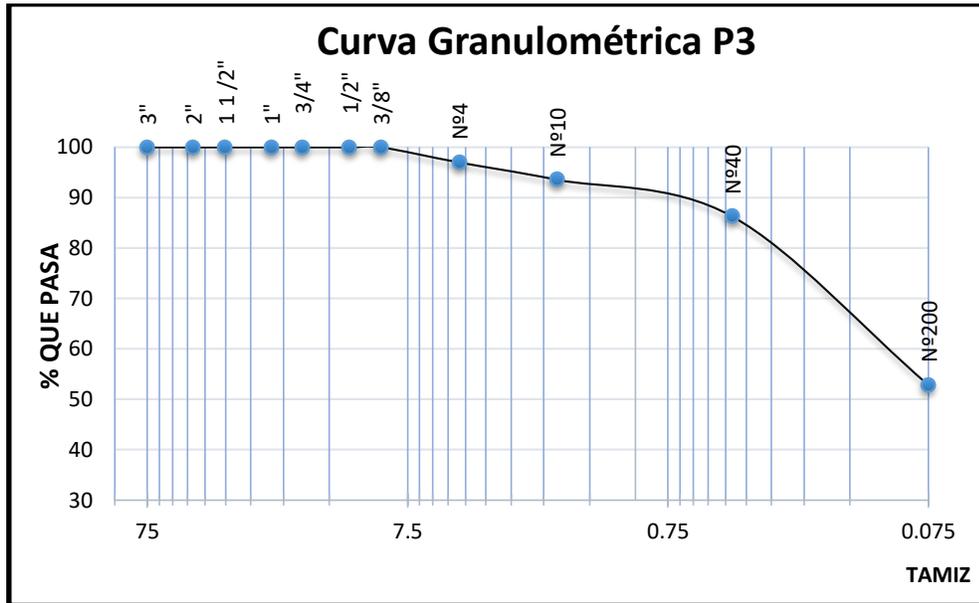
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 2. Curva granulométrica sub rasante P₂



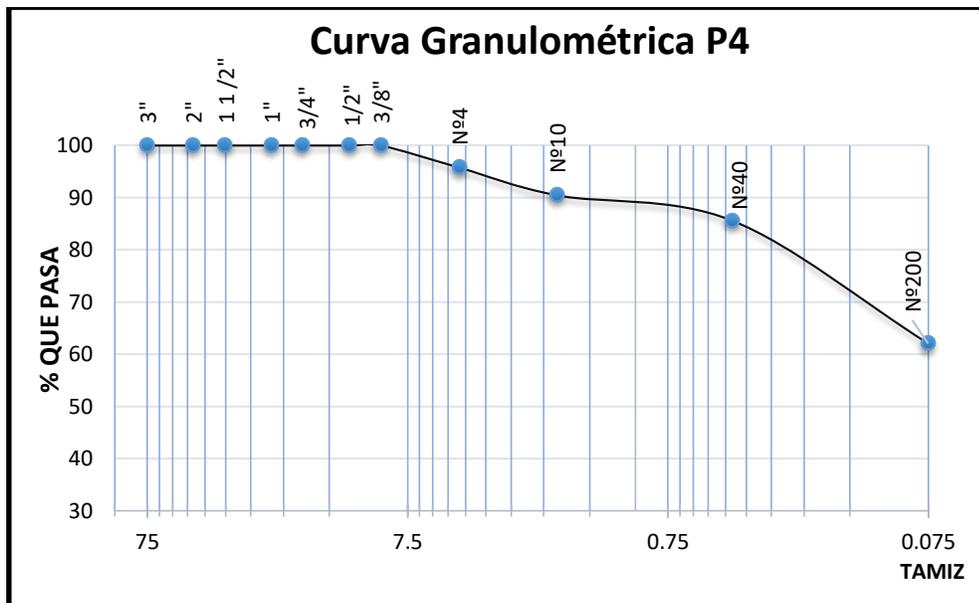
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. Curva granulométrica sub rasante P₃



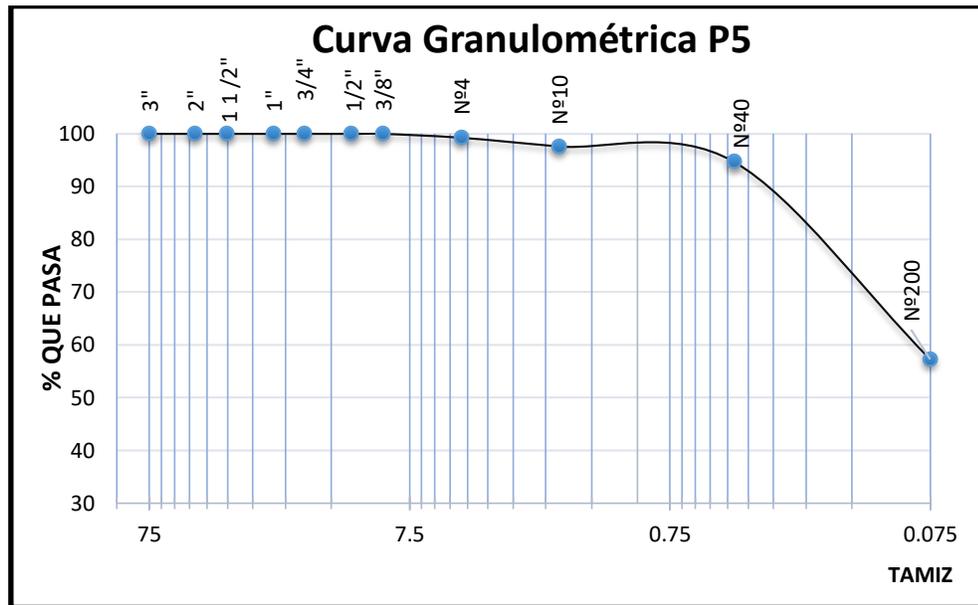
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4. Curva granulométrica sub rasante P₄



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 5. Curva granulométrica sub rasante P₅



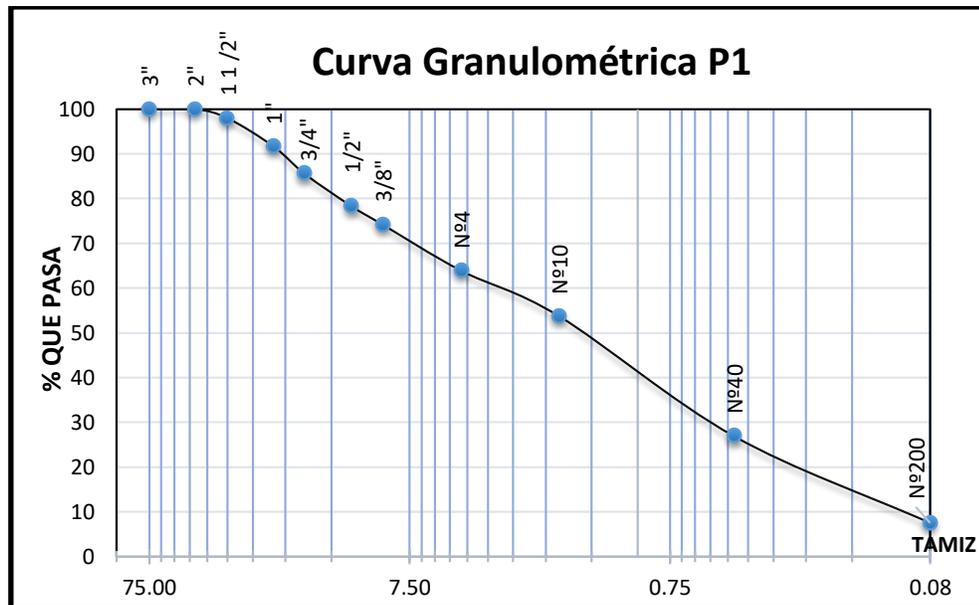
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Resultados de análisis granulométrico de la sub base

Granulometría de la sub base					
Punto	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Tamiz	% Que pasa del total				
3"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	97.96	100.00	100.00	96.86	100.00
1"	91.66	93.57	96.53	86.71	95.42
3/4"	85.57	84.95	89.74	77.31	87.99
1/2"	78.26	72.03	79.14	68.09	79.76
3/8"	74.18	64.37	74.19	62.77	73.22
N°4	63.91	48.91	61.85	48.90	58.38
N°10	53.77	36.73	50.10	36.76	43.03
N°40	26.95	26.43	37.60	25.84	28.88
N°200	7.60	16.83	20.02	15.89	19.02

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 6. Curva granulométrica sub base P₁



Fuente: Elaboración propia.

- **Determinación de límites de Atterberg (ASTM D 4318; AASHTO T89-T90)**

Se define Límites de Atterberg o Límites de Consistencia como las diferentes fronteras convencionales entre cualquier de los estados o fases que un suelo pueda estar, según su contenido de agua en orden decreciente; los estados de consistencia definidos por Atterberg son: estado líquido, estado semilíquido, estado plástico, estado semisólido y estado sólido. Llamándose límites de plasticidad a las fronteras (límite líquido y límite plástico) que definen el intervalo plástico.

- **Límite líquido**

El Límite Líquido de un suelo se define como el contenido máximo de humedad a partir del cual dicho suelo deja de comportarse plásticamente y pasa a comportarse como un líquido. Se determina mediante el método de la cuchara de casa grande (NTL-105).

- **Límite plástico**

Se determina en base a la menor cantidad de humedad de un suelo que permita realizar unos rollitos de 3mm de diámetro aproximadamente hasta que presenten pequeñas fisuras.

Esto se repite unas 3 veces como mínimo, se pesarán los rollitos en las cápsulas para luego dejarlos secar en el horno.

Figura 24. Materiales y realización de límite líquido y límite plástico



Fuente: Elaboración propia.

Resumen de resultados de límites de Atterberg

Tabla 10. Resultados de límites de Atterberg de la sub rasante

Punto	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Límite líquido L.L. (%)	0	0	0	22.1	16.4
Límite plástico L.P. (%)	0	0	0	12.97	11.96
Índice de plasticidad I.P. (%)	N.P.	N.P.	N.P.	9.13	4.48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Resultados de límites de Atterberg de la sub base

Punto	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Límite líquido L.L. (%)	---	---	---	---	---
Límite plástico L.P. (%)	---	---	---	---	---
Índice de plasticidad I.P. (%)	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.

Fuente: Elaboración propia.

Clasificación de la sub rasante y la sub base

Tabla 12. Clasificación de suelos de la sub rasante según AASHTO

Punto	Límite líquido	Límite plástico	Índice plasticidad	Índice de grupo	Clasificación AASHTO
P ₁	---	---	N.P.	1	A-4(1)
P ₂	---	---	N.P.	2	A-4(2)
P ₃	---	---	N.P.	4	A-4(4)
P ₄	22.1	12	9.13	5	A-4(5)
P ₅	16.4	11	4.48	4	A-4(4)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Clasificación de suelos de la sub base según AASHTO

Punto	Límite líquido	Límite plástico	Índice plasticidad	Índice de grupo	Clasificación AASHTO
P ₁	---	---	N.P.	0	A-1-b(0)
P ₂	---	---	N.P.	0	A-1-b(0)
P ₃	---	---	N.P.	0	A-1-b(0)
P ₄	---	---	N.P.	0	A-1-b(0)
P ₅	---	---	N.P.	0	A-1-b(0)

Fuente: Elaboración propia.

- **Determinación de la relación humedad - densidad del suelo, método compactación Proctor modificado (ASTM D422; AASHTO T-180)**

La importancia de la compactación de los suelos estriba en el aumento de resistencia y disminución de la capacidad de deformación que se obtienen al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten su peso específico seco, disminuyendo sus vacíos. Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc. Algunas veces se hace necesario compactar el terreno natural.

Figura 25. Esquema del ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia.

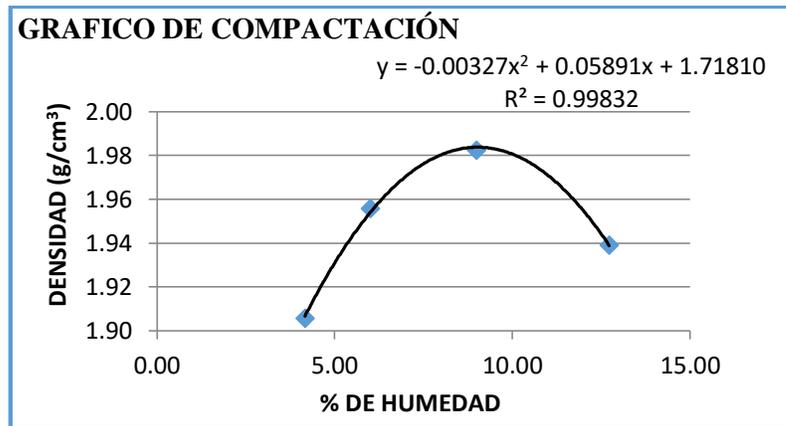
Resumen de los resultados del ensayo de compactación T – 180

Tabla 14. Resultados de los ensayos de compactación de la sub rasante

Puntos	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1.983	1.974	1.962	1.948	1.966
Humedad óptima (%)	9.008	9.107	9.251	10.00	9.233

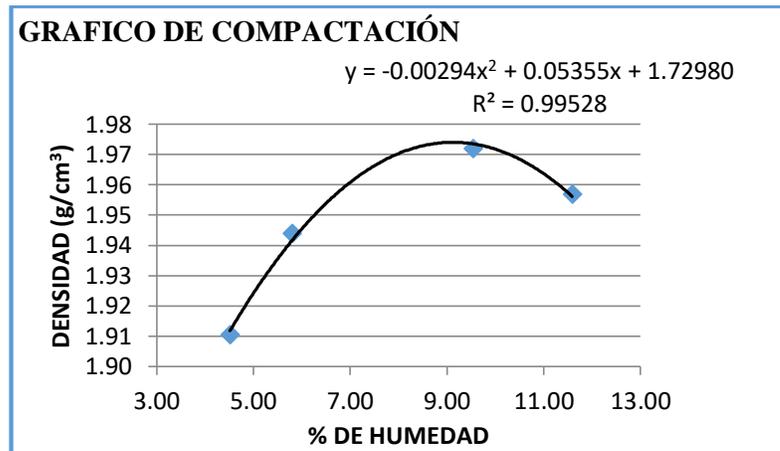
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 7. Curva de compactación sub rasante P₁



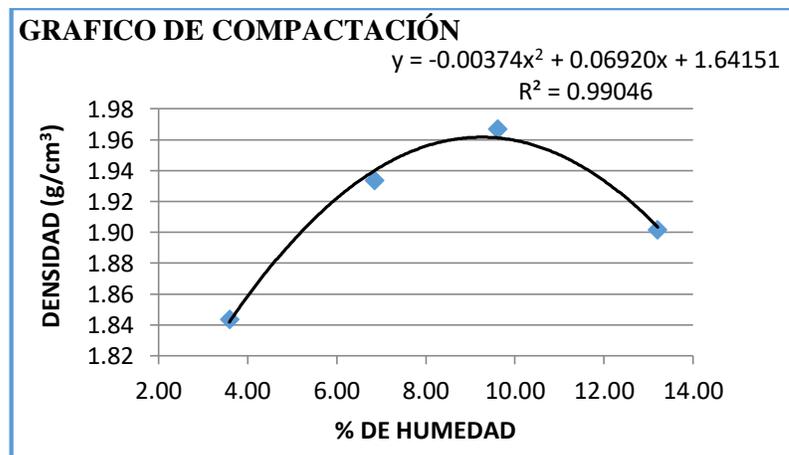
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 8. Curva de compactación sub rasante P₂



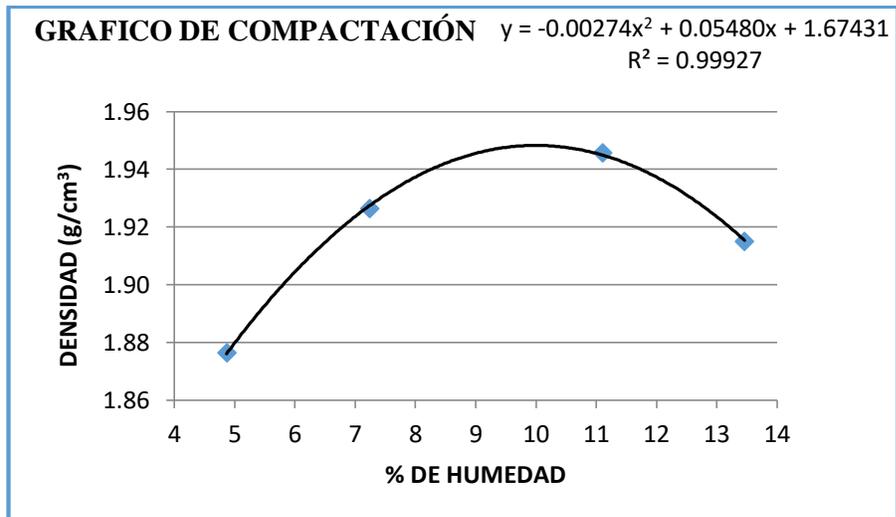
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 9. Curva de compactación sub rasante P₃



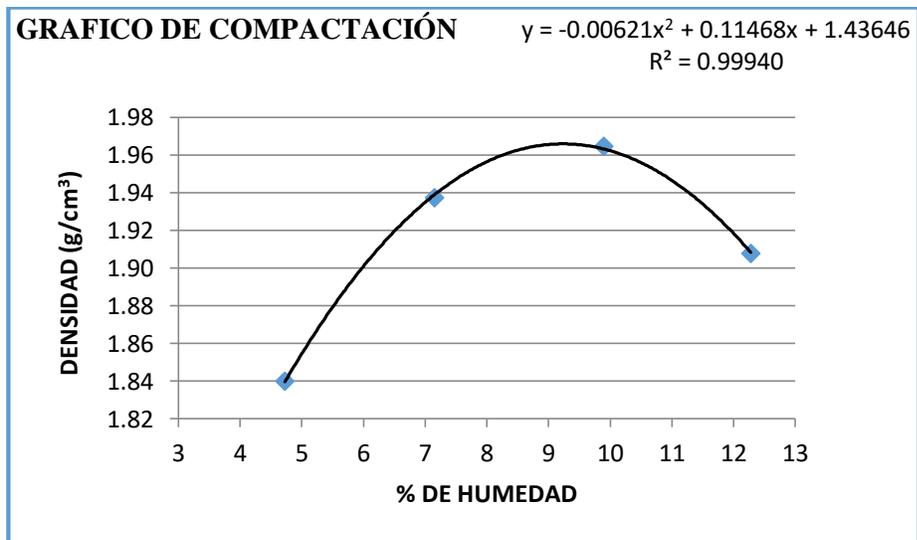
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10. Curva de compactación sub rasante P₄



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 11. Curva de compactación sub rasante P₅



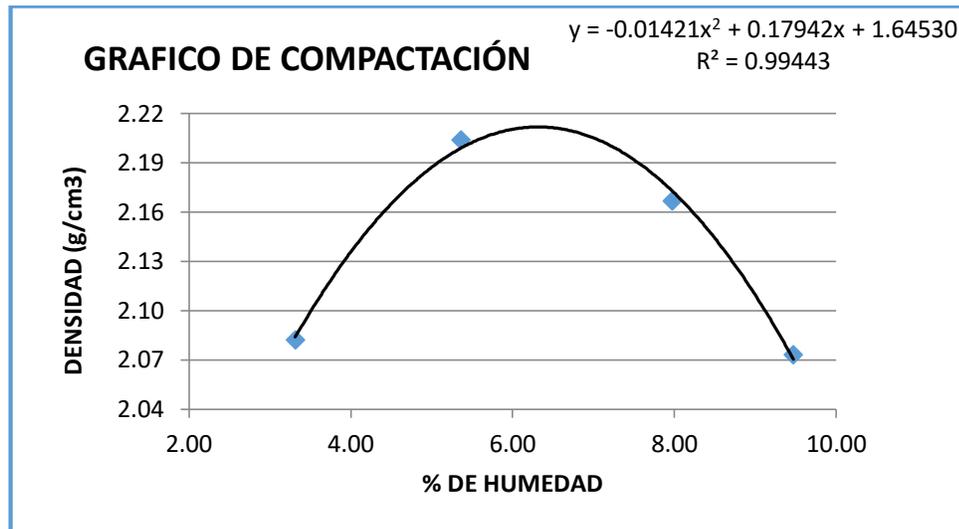
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Resultados de los ensayos de compactación de la sub base

Punto	P ₁
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	2.2
Humedad óptima (%)	6.31

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 12. Curva de compactación sub base P₁



Fuente: Elaboración propia.

- **Determinación del valor relativo de soporte de los suelos C.B.R. (ASTM D1883; AASHTO T-193)**

El ensayo CBR (la ASTM denomina el ensayo simplemente un ensayo de relación de soporte) mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El valor de CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente con fines de utilización con base y subrasante bajo pavimentos de carreteras. Conociendo la densidad máxima y humedad óptima de las muestras se procedió a la determinación de la capacidad de soporte respectivos, mediante el ensayo de CBR (California Bearing Ratio).

Figura 26. Esquema del ensayo CBR





Fuente: Elaboracion propia.

El CBR de la sub rasante es el parámetro que se utilizó para estimar el módulo de reacción de la sub rasante utilizando correlaciones entre ambas.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los CBR determinados:

Tabla 16. Resultados de los ensayos de CBR de la sub rasante

CBR	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅
C.B.R 95 % D. Max.	8.28	6.77	4.61	3.32	5.73
C.B.R 100 % D. Max	16.79	15.71	10.44	7.54	14.3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Resultados de los ensayos de CBR de la sub base

CBR	P₁
C.B.R 95 % D. Max.	25.03
C.B.R 100 % D. Max	50.0

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.3 Trabajo de gabinete

Este proceso consiste en analizar estructuralmente el pavimento existente, dicho análisis estructural sería realizado por medio del software EverFE 2.26, esto lo conseguiremos sometiendo a el pavimento a las siguientes cargas:

- Cargas por ejes de rueda
- Cargas por gradiente térmico

3.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS A UTILIZAR EN LA MODELACIÓN

Como se menciona anteriormente, se retoman algunos parámetros del diseño original para conseguir modelar la estructura. Para conocer la respuesta estructural del pavimento rígido, se emplean modelos computarizados utilizando en este caso el software EverFE, este es un programa tridimensional para el análisis de pavimentos rígidos mediante elementos finitos. Cabe mencionar que el Instituto Boliviano del cemento y el hormigón (IBCH), comprometido con el desarrollo profesional en el campo de infraestructuras viales y motivados por la investigación en el desarrollo de nuevas metodologías a trabajar sobre pavimentos rígidos utilizan este software para modelación y diseño de losas, que permite introducir las variables climáticas y geométricas para el diseño del pavimento. A continuación, se describen cada uno de los parámetros que son necesarios y que fueron utilizados en el diseño del pavimento existente para la modelación.

3.3.1 Geometría

La de medición de la geometría de las losas se la realizo con un flexómetro, registrando el largo, ancho y espesor en cada sección de análisis, las medidas obtenidas y observaciones son las siguientes:

Tabla 18. Geometría de las losas

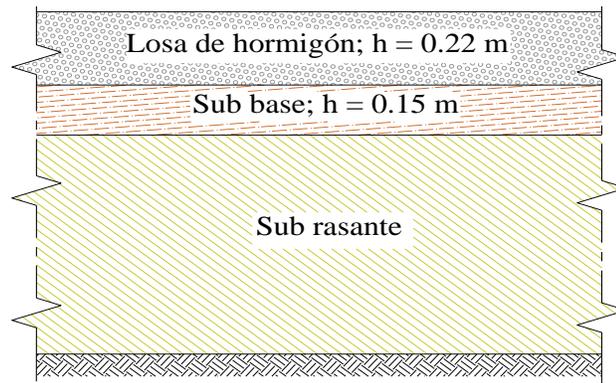
Progresiva	Geometría de las losas			Ancho de plataforma (m)	Carril analizado	Topografía	Observaciones
	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)				
6+000	3.00	2.70	0.22	10.80	Izquierdo	Montañosa	Tramo curvo
7+000	3.00	2.60	0.22	10.40	Izquierdo	Montañosa	Tramo curvo
16+000	3.00	2.60	0.22	10.40	Derecho	Montañosa	Tramo curvo
17+000	3.00	2.60	0.22	10.40	Derecho	Montañosa	Tramo curvo
18+000	3.00	1.95	0.22	7.80	Derecho	Ondulada	Tramo recto

Fuente: Elaboración propia.

Espesores de capas que conforman la estructura del pavimento

La estructura del pavimento está compuesta por tres capas; la capa de rodadura con un espesor de 22 cm, la segunda capa es la sub base con espesor de 15 cm, y por último la sub rasante que se considera infinita.

Figura 27. Estructura de pavimento tramo campo Pajoso – Caraparí



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales que conforman la estructura del pavimento rígido en estudio correspondiente al tramo Campo Pajoso – Caraparí, fueron obtenidas directamente del pavimento existente en el caso de las losas de concreto, en cuanto a la capa sub base y la sub rasante se tomaron muestras de las mismas para su respectiva caracterización en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Losa de concreto

El principal elemento del pavimento rígido es el hormigón, cuyos componentes: agregados, cemento y agua, que han de emplearse en su confección, deben ser de excelente calidad. Como medida de calidad y durabilidad del hormigón, se emplea la resistencia a compresión simple tomada a los 28 días; sin embargo, en el diseño de pavimentos, el parámetro de resistencia que interesa es el módulo de rotura o resistencia a tracción del hormigón por flexión, para el análisis correspondiente se utilizó el módulo de rotura de $4.3 \text{ (N/mm}^2\text{)}$, valor establecido por las especificaciones técnicas del diseño.

El módulo elástico del concreto (E_c), es un parámetro que indica la rigidez y la capacidad de distribuir las cargas que soporta la losa del pavimento. Mientras más alto sea el valor

del módulo elástico, más rígida será la losa. Los esfuerzos, y deflexiones, están influenciados por el valor del módulo elástico. El módulo de elasticidad se obtuvo a partir de la resistencia a la flexión del hormigón, utilizando la ecuación de la AASHTO-93 para un módulo de Poisson de 0.15, que de igual manera fue utilizada en el diseño existente:

$$S_c = 43,5 \frac{E_c}{10^6} + 3370$$

$$E_c = \frac{1000000[S_c(kPa) - 3370]}{43,5}$$

$$E_c = \frac{1000000[(4,3 \times 1000) - 3370]}{43,5}$$

$$E_c = 21379310.34 \text{ kPa}$$

$$E_c = 21379.31 \frac{N}{mm^2}$$

Donde:

E_c = Módulo de elasticidad (N/mm²)

S_c = Módulo de rotura (N/mm²)

Además, es necesario conocer el coeficiente de expansión térmica (α) y la densidad de la losa del pavimento, valores que no están establecidos en las especificaciones técnicas del diseño. Por ello ante la falta de estos datos nos apoyamos en el texto: DISEÑO DE PAVIMENTOS AASHTO-93 Y SOFTWARE DIPAV 2.3, del Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (IBCH), el cual utiliza para fines de cálculo una densidad media del hormigón de 2300 kg/m³, eh indica que el coeficiente de expansión térmica es una medida del cambio de dimensiones del material cuando está sujeto a variaciones de temperatura y depende de factores como la relación agua cemento, la edad del hormigón, el contenido de cemento y la humedad relativa del ambiente, sin embargo el tipo de agregado grueso en la mezcla tiene el mayor impacto en este coeficiente, indicando que para un hormigón con agregado grueso de tipo grava corresponde un coeficiente de expansión térmica de $1.08 \cdot 10^{-5}$ por grado centígrado.

Capa sub base

La capa sub base se utiliza en los pavimentos rígidos, principalmente para evitar el bombeo de finos, proveer una plataforma estable y uniforme para la construcción y minimizar la deformabilidad del suelo de fundación, en este sentido, si bien no se requieren altas resistencias, es desde todo punto de vista recomendable el empleo de dicha sub base.

El pavimento existente cuenta con una capa granular con calidad de sub base de espesor 15 cm, el parámetro requerido de la sub base es el módulo de elasticidad también denominado módulo resiliente (MR), para ello el texto de IBCH indica que, dado que no siempre se tienen equipos para ejecutar un ensayo de módulo resiliente, es conveniente relacionarlo con otras propiedades de los materiales. Por lo tanto, el texto presenta las siguientes ecuaciones que permiten determinar el MR en función al CBR.

Para suelos con granos finos:

$$MR = B * CBR (Psi)$$

Donde:

MR = Módulo resiliente (Psi)

Si CBR < 10 % entonces B = 1500, pero este valor puede variar entre 750 y 3600.

Para suelos granulares donde el 12% < CBR < 80%:

$$MR = 22.1 \times CBR^{0.55} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

Donde:

MR = Módulo resiliente (N/mm²)

Dado que en la caracterización de los 5 puntos de la capa sub base corresponden a un suelo A-1-b (0), se realizó un ensayo de valor soporte CBR el cual representara a los 5 puntos, dando este un valor de CBR = 50%.

Calculo del módulo resiliente de la sub base para un CBR de 50 %:

$$MR = 22.1 \times 50^{0.55}$$

$$MR = 190.03 \frac{N}{mm^2}$$

Otro parámetro que se requiere de la sub base es el coeficiente de Poisson, en este caso tras la consulta a distintas bibliografías, (Huang) indica que la variación del módulo de Poisson no tiene incidencia considerable en el comportamiento del pavimento, lo que permite utilizar el valor característico de acuerdo al material.

Tabla 19. Rangos típicos de coeficientes de Poisson

Material	Coefficiente de Poisson
Concreto asfáltico	0,30 a 0,40
Hormigón hidráulico	0,10 a 0,20
Bases granulares	0,20 a 0,40
Suelos cohesivos	0,25 a 0,45
Suelos estabilizados con cemento	0,10 a 0,30
Suelos estabilizados con cal	0,10 a 0,30

Fuente: Manual de diseño de conservación vial ABC 2011

Tomando como referencia los valores característicos de módulo de Poisson, de la tabla anterior para un material granular como lo es la capa sub base el módulo de Poisson correspondiente es: $\nu = 0.30$.

Capa sub rasante

Los estudios más extensos sobre el comportamiento de los pavimentos rígidos consideran a la sub rasante como una cimentación de Winkler, asumiendo ésta como un conjunto de resortes independientes. En este tipo de cimentaciones, el parámetro más importante es el Módulo de Reacción de la sub rasante (k), que puede ser determinado mediante un ensayo de carga de placa, o de acuerdo a las recomendaciones de la norma AASHTO, se puede efectuar una correlación de los valores soporte de la sub rasante, obtenidos por otros métodos. Esto posibilita el empleo del valor de CBR, que también es un valor de medida de la capacidad soporte.

Para el cálculo del módulo de elasticidad de la sub rasante (k), inicialmente se determinó el valor soporte CBR de cada punto mediante ensayos en el laboratorio de la UAJMS.

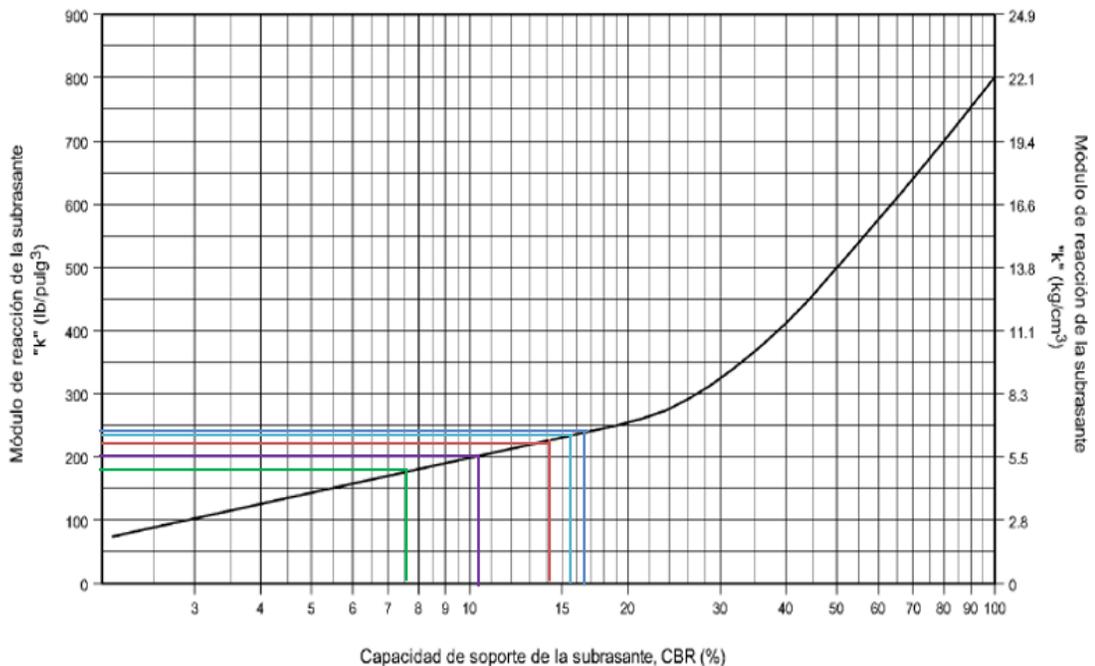
Calculo del módulo de elasticidad (k) de la sub rasante:

Se determinó los módulos (k) por medio de ecuaciones que correlacionan el CBR con el módulo de reacción de la sub rasante, también se utilizó el grafico “Relación entre el CBR y el módulo de reacción de la sub rasante k”. Para el análisis se trabajará con los resultados de módulo de elasticidad provenientes de las ecuaciones debido a que al utilizar el grafico es meno preciso su estimación.

$$\text{Para CBR} \leq 10 \quad K = 0.25 + 5.15 \times \log(\text{CBR}) \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\text{Para CBR} > 10 \quad K = 4.51 + 0.89 \times [\log(\text{CBR})]^{4.34} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \right)$$

Gráfico 13. Relación entre el CBR y el módulo de reacción de la sub rasante



Fuente: Portland Cement Association.

Los valores obtenidos a partir de dicho gráfico y por medio de las ecuaciones son los siguientes:

Tabla 20. Módulo de reacción de la sub rasante

Puntos	CBR	Ecuación		Grafico	
		K (kg/cm ³)	K (N/mm ³)	K (lb/pulg ³)	K (N/mm ³)
P1	16.79	67.91	0.068	170	0.062
P2	15.71	65.75	0.066	165	0.061
P3	10.44	55.84	0.056	155	0.054
P4	7.54	46.75	0.047	152	0.046
P5	14.13	62.67	0.063	153	0.060

Fuente: Elaboración propia.

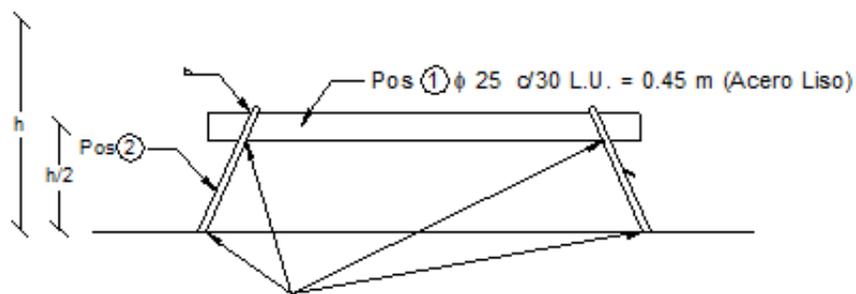
Propiedades de las barras de amarre y pasajuntas

Dovelas (Barras pasajuntas en juntas transversales)

De acuerdo a las especificaciones técnicas indican que el acero de las barras para pasadores será el comúnmente denominado “acero dulce”, los pasadores serán barras lisas de acero de sección circular de las dimensiones indicadas en los planos. Tendrá una tensión mínima de fluencia de 240 Mpa.

Tras la revisión del diseño existente las juntas transversales cuentan con barras de acero liso, de diámetro 25 mm c/30 cm y de una longitud de 0,45 m.

Figura 28. Detalle de barra pasajunta (Dovela)



Fuente: Elaboración propia.

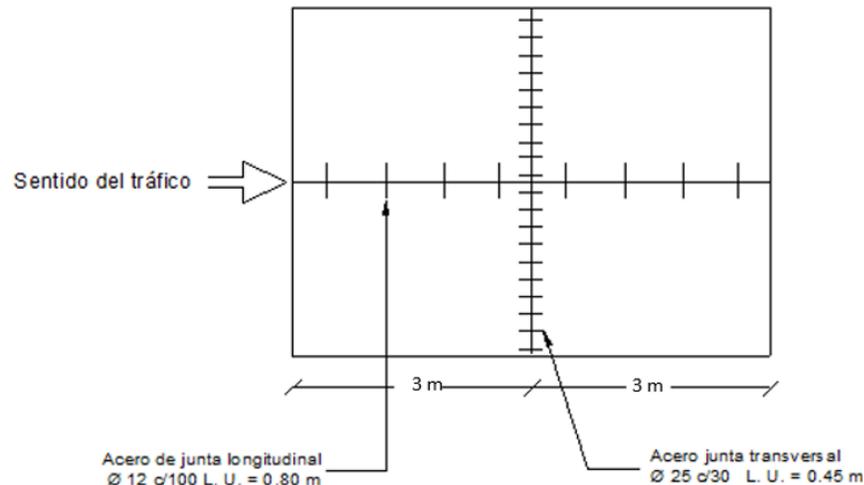
Barras longitudinales de amarre existentes

Las barras de amarre tienen como principal objetivo mantener la unión horizontal y vertical de los carriles del pavimento, o bermas atadas, las especificaciones indican que

serán de acero corrugado, de una resistencia mínima de 420 Mpa, se colocarán donde lo indiquen los planos de proyecto según las dimensiones fijadas en los mismos.

De acuerdo a la información obtenida la armadura existente en las juntas longitudinales del pavimento corresponde a barras corrugadas de diámetro 12 mm c/100 cm y una longitud de 0,80 m.

Figura 29. Vista en planta de las barras de amarre y pasajuntas



Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el modelado, el programa solicita el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν) del acero, y para ello supone que las barras de amarre y pasajuntas tienen el mismo E y ν . Por qué las barras pasajuntas no experimentan expansión o contracción térmica ya que no están adheridas a la losa y permiten que estas puedan expandirse o contraerse libremente. Entonces es así que el módulo de elasticidad a utilizar será el de las barras amarre, valor que el para el cálculo y diseño de estructuras en el rango elástico, el CBH -87 recomienda utilizar convencionalmente el valor de $E_s = 210000$ Mpa, y un módulo de Poisson de $\nu = 0.30$.

3.3.3 Cargas de tráfico y gradiente térmico

Una vez definidas la geometría y los materiales de la estructura del pavimento es necesario ingresar en el software la ubicación, las características y la magnitud de las cargas de tráfico, así como también los gradientes térmicos.

Cargas de tráfico por eje

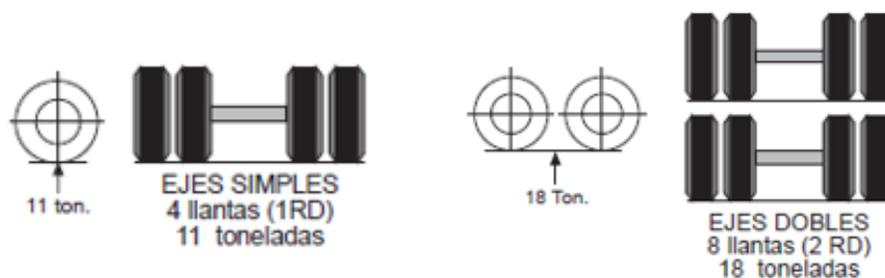
Con respecto al tramo existente fue diseñado mediante la metodología empírica AASHTO-93, transformado el tráfico en un Número Equivalente de Ejes Tipo, de 80 KN. (eje simple), este número equivalente de ejes transformados se los denomina ESAL'S.

El programa modelador computacional de elementos finitos Ever FE 2.26, trabaja bajo cargas por eje y no con los ESAL'S, tomando como principio la metodología de diseño empírico-mecanicista, que consiste en modelar la estructura a partir de los espesores, la geometría y las rigideces (módulos elásticos, coeficiente de reacción y módulo de Poisson) de las capas del pavimento, para calcular las tensiones provocadas por la carga tipo e identificar, los esfuerzos máximos principales capaces de producir rotura en las losas, este esfuerzo se lo compara con el módulo de rotura del concreto hidráulico.

Las cargas por eje que se han considerado para el análisis fueron (eje simple y tándem) localizados en puntos críticos (borde y esquina).

Las magnitudes de estas cargas proceden de la ley 441 de cargas que tiene por objeto, establecer los pesos y dimensiones vehiculares máximos permitidos para la circulación en las carreteras de la Red Vial Fundamental y sus mecanismos de control.

Figura 30. Límites de pesos permitidos por ejes



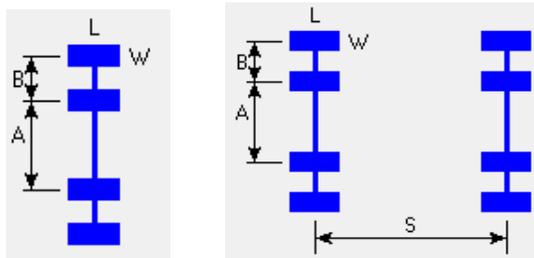
Fuente: Ley 441 de control de pesos y dimensiones vehiculares en la red vial fundamental.

Si comparamos la carga máxima para un eje simple establecida por la ley 441 de 11 T, evidenciamos que es mayor a la de 8.2 T que considera la metodología AASHTO -93,

por ello para el análisis se consideró utilizar la de mayor magnitud a efectos de exponer al pavimento en una condición más crítica.

Los parámetros geométricos A, B, L, W y S se detallan en el gráfico Ever FE.

Figura 31. Parámetros geométricos de los ejes de rueda eje simple, y tándem



Fuente: Elaboración propia.

Los valores de los parámetros geométricos y cargas máximas permitidas de los ejes empleados se muestran a continuación:

Tabla 21. Parámetros geométricos de ejes de rueda

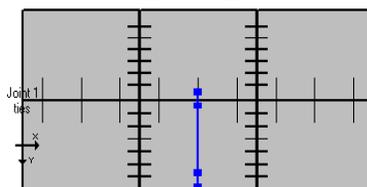
PARAMETRO	SIMPLE (mm)	TANDEM (mm)
A	1500	1500
B	350	350
L	200	200
W	150	150
S	---	1500
CARGA (Ton)	11	18
CARGA (KN)	108	177

Fuente: Elaboración propia.

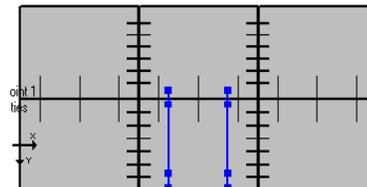
Localización de ejes en el sistema de losa propuesto

Figura 32. Localización de ejes en losas sin soporte lateral

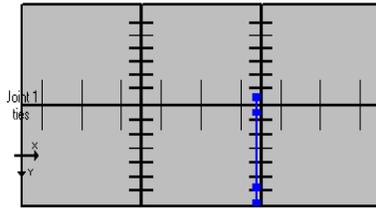
Carga de tránsito en el borde
sin soporte lateral
eje simple



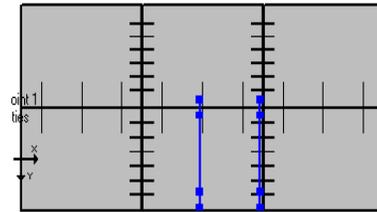
Carga de tránsito en el borde
sin soporte lateral
eje tándem



Carga de tránsito en la esquina
sin soporte lateral
eje simple



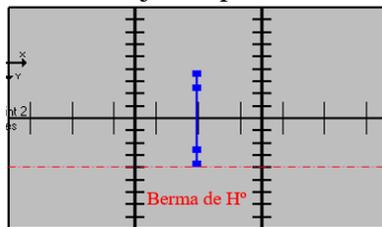
Carga de tránsito en la esquina
sin soporte lateral
eje tandem



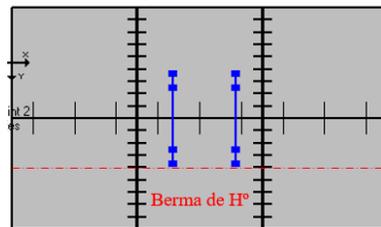
Fuente: Elaboración propia.

Figura 33. Localización de ejes en losas con soporte lateral

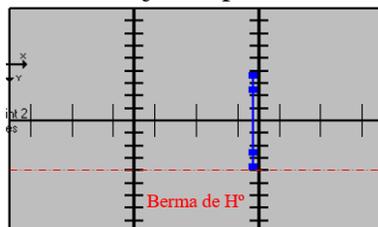
Carga de tránsito en el borde
con soporte lateral
eje simple



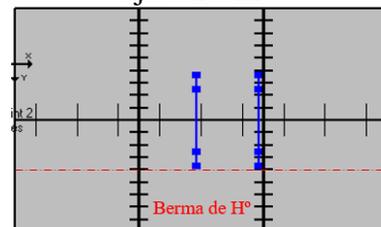
Carga de tránsito en el borde
con soporte lateral
eje tandem



Carga de tránsito en la esquina
con soporte lateral
eje simple



Carga de tránsito en la esquina
con soporte lateral
eje tandem



Fuente: Elaboración propia.

Gradiente térmico

La temperatura es un factor ambiental que influye altamente en el desempeño de los pavimentos rígidos. Los cambios de temperatura entre la superficie y la parte inferior de la losa producen esfuerzos en el pavimento. En el diseño de los pavimentos rígidos, por lo general, se suele considerar solamente los esfuerzos producidos por las cargas.

El esfuerzo en cualquier punto se calcula como el producto del coeficiente de expansión térmica y el cambio de temperatura en ese punto. Debido a la falta de información en

nuestro medio sobre el gradiente térmico en losas de pavimento rígido, los valores referenciales asumidos serán según los datos climatológicos de temperaturas máximas y mínimas medias anuales de la estación aeropuerto Yacuiba que se encuentra próxima al tramo en estudio.

Temperatura máxima media anual $T_M = 28 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura mínima media anual $T_m = 16 \text{ }^\circ\text{C}$

Gradiente de Temperatura = $28 - 16 = 12 \text{ }^\circ\text{C}$

3.4 DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFLEXIONES

Después de reunir los datos que definen al pavimento existente, se realiza la simulación de los efectos que las cargas y condiciones definidas tienen sobre él. Esta simulación da como resultado valores de esfuerzos y deflexiones en las partes críticas pavimento.

La siguiente tabla es un resumen de valores de los distintos materiales que conforman el pavimento existente y que fueron utilizados para la modelación.

Tabla 22. Resumen de las propiedades de los materiales

Parámetro	Datos		
Losa			
Módulo elástico	21379.31 N/mm ²		
Coefficiente de Poisson	0.15		
Coefficiente de expansión térmica	$1.08 \cdot 10^{-05} \text{ }^\circ\text{C}$		
Densidad	2300 kg/m ³		
Sub base			
Módulo de elasticidad	190.03 N/mm ²		
Coefficiente de Poisson	0.3		
Sub rasante			
Módulo de reacción de la sub rasante	P ₁	K ₁	0.068 N/mm ³
	P ₂	K ₂	0.066 N/mm ³
	P ₃	K ₃	0.056 N/mm ³
	P ₄	K ₄	0.047 N/mm ³
	P ₅	K ₅	0.063 N/mm ³
Dovelas			
Módulo elástico	210000 N/mm ²		
Coefficiente de Poisson	0.3		

Fuente: Elaboración propia

3.4.1 Análisis estructural por medio de elementos finitos en EverFE 2.26

En el presente proyecto se realizó un total de 100 modelaciones para los distintos escenarios que se describirán a continuación:

Para cada punto de estudio se modeló al pavimento en su estado actual (lateralmente soportado), con la posición de las cargas en el borde y en la esquina bajo solamente cargas de tránsito (eje simple y tándem), haciendo un total de 20 escenarios 4 por cada punto de estudio, luego a los mismos se le añadió el efecto combinado de cargas (gradiente térmico) generando otras 20 modelaciones, de los cuales se registraron los esfuerzos máximos y sus respectivas deflexiones. Posteriormente se simuló al pavimento quitando el soporte lateral existente (berma adherida) en cada sección para las mismas condiciones anteriormente mencionadas generando otras 40 simulaciones. Con los resultados obtenidos en el estado actual del pavimento es decir con soporte lateral y en las condiciones de sin soporte lateral se realizó un análisis comparativo en función a la respuesta estructural teórica de los mismos bajo las solicitaciones de cargas impuestas.

Luego se identificó los 2 esfuerzos más críticos, generados en cada sección de estudio siendo estos los más desfavorables de acuerdo a las condiciones reales del pavimento (lateralmente soportado) y con su respectivo espesor de 22cm.

Posteriormente para los escenarios más críticos ya identificados, se simuló al pavimento reduciendo el espesor de las losas a 21 cm, con la finalidad de ver si las mismas cumplen el criterio de falla por fatiga y a la vez evidenciar si la presencia de la berma ayuda a optimizar la estructura, el número de simulaciones realizadas en las condiciones más críticas para las losas con 21 cm de espesor fueron 10. De la misma manera se realizaron otras 10 simulaciones para un espesor de 20 cm, siendo este el espesor límite.

3.4.2 Descripción del programa

El programa EverFE 2.26 trabaja con mallados de distintos grados de refinamiento y se compone de seis interfaces que realizan diferentes funciones:

- Geometry, contiene una herramienta CAD que permite construir un modelo geométrico e introducir los datos característicos de las capas y definir las fronteras del dominio del modelo.

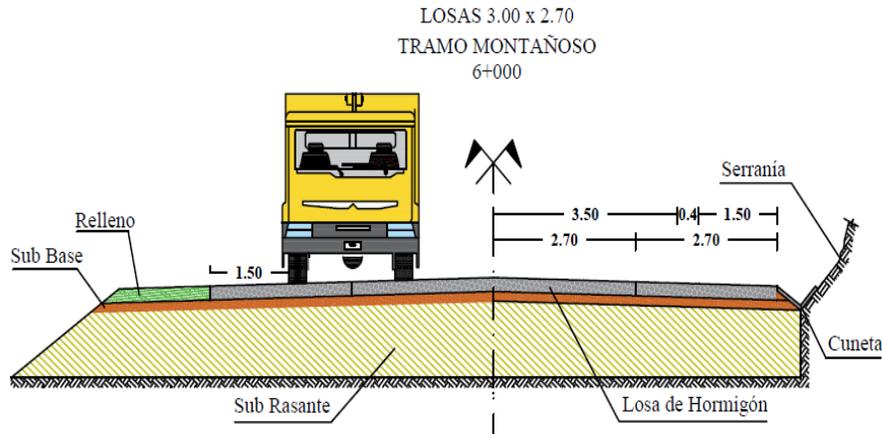
- Material, almacena los parámetros de rigidez de cada material, densidades, coeficiente de expansión térmica del concreto hidráulico y las condiciones de liga entre capas.
- Loading, almacena los parámetros de carga, tipo de eje, lado y ancho del contacto de rueda (área de contacto rectangular), ubicación sobre el plano x-y de la(s) losa(s) y carga por temperatura.
- Dowel, contiene los parámetros de rigidez y geometría de las dovelas y barras de amarre, además, condiciones de liga entre dovelas y el concreto hidráulico de la(s) losa(s).
- Interlock, almacena abertura de las juntas con su respectiva rigidez, acompañado de la opción de modelo lineal a no lineal.
- Meshing, determina los parámetros de mallado.
- Solver, ejecuta el solucionador de elementos finitos.
- Results, permite obtener los resultados del análisis.

Los pasos típicos del procedimiento de análisis de un problema con EverFE 2.26, son: ingresar los datos de dimensionamiento, número de capas, condiciones de frontera, espesores y parámetros de rigidez (módulos elásticos, reacción y de Poisson), otros factores inherentes al material (densidades y coeficiente de expansión térmica del concreto hidráulico), carga, ancho y largo del área de contacto (el programa trabaja con área de contacto rectangular) espaciamiento de las llantas, carga por temperatura, dovelas y barras de amarre con sus propiedades geométricas, abertura de las juntas, elegir combinación de mallado, ejecutar el solucionador y obtener resultados.

A continuación, se presentará un ejemplo del manejo del programa, aplicado en la sección de la progresiva 6+000 para los casos de pavimento con berma (soporte lateral), y sin berma (sin soporte lateral), bajo la carga por eje simple (108 KN) en el borde de la losa.

Determinación de la respuesta estructural en la progresiva 6+000, considerando el soporte lateral (berma = 1.50 m, carril izquierdo):

Figura 34. Sección transversal del pavimento en la progresiva 6+000 (Con berma).



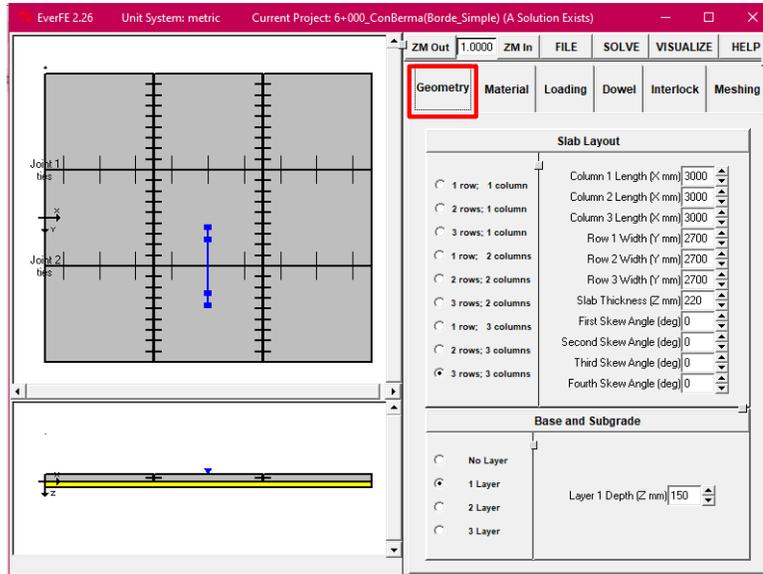
Fuente: Elaboración propia.

Geometría

El panel de geometry permite especificar la geometría básica del sistema de pavimento rígido y se divide en dos subpaneles: Diseño de losa y Base / Subrasante. Cualquier cambio en la geometría del sistema se refleja inmediatamente en las vistas en planta y en alzado que se muestran en la mitad izquierda del panel de entrada Ever FE 2.26.

Para este ejemplo se presenta 9 losas, simulando al carril izquierdo correspondiente a la progresiva 6+000 donde las dimensiones de las losas son de 3 x 2.70 m, el ancho de carril para el tránsito de los vehículos es de 3.50 m, esta sección presenta un sobreebanco de 0.40 m y una berma de 1.50 m, ambas del mismo material y adheridas a las losas.

Figura 35. Parámetros geométricos del pavimento a modelar

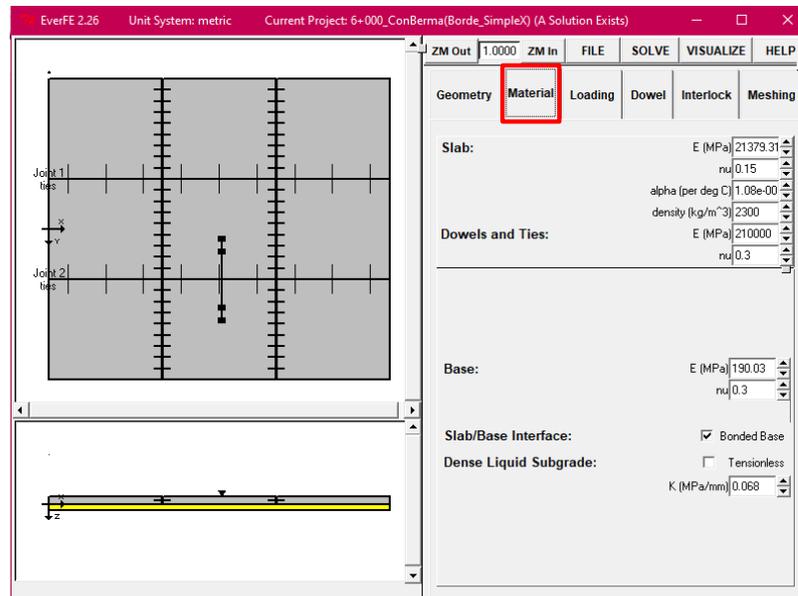


Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Propiedades de los materiales

El panel de material controla la especificación de las propiedades del material para las losas, dovelas, capas elásticas de base / subrasante, la base líquida densa y la interfaz losa-base. Estas propiedades ya fueron especificadas anteriormente y los valores establecidos se encuentran en sus respectivas casillas.

Figura 36. Panel de entrada de propiedades mecánicas y estructurales de los materiales de la estructura de pavimento rígido



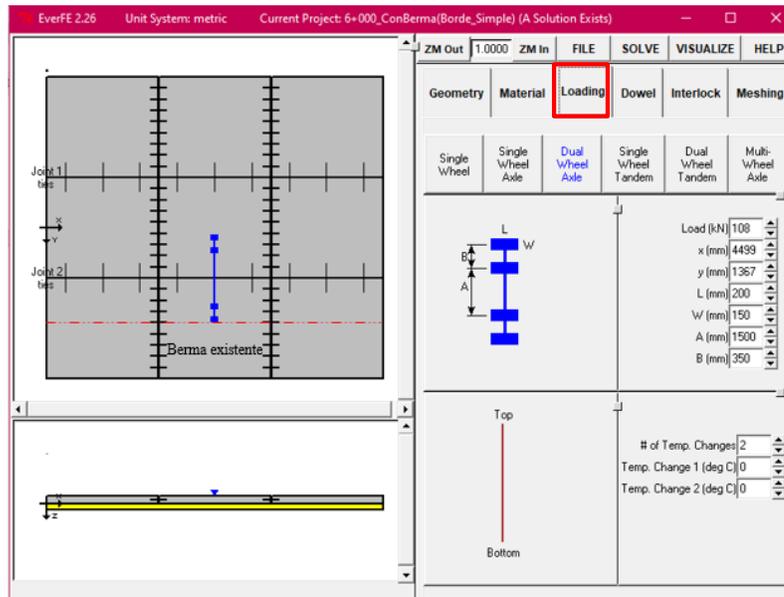
Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Cargas

En EverFE, se pueden especificar tanto las cargas de rueda / eje como los efectos térmicos. Las cargas de rueda / eje proporcionadas incluyen eje de una sola rueda, eje de dos ruedas, tándem de una sola rueda, tándem de dos ruedas y eje genérico de varias ruedas. El usuario puede ingresar los valores deseados para todos los parámetros geométricos en las unidades apropiadas.

Para el presente ejemplo se empleó una carga por eje dual simple de 108 KN situada en el borde del carril.

Figura 37. Panel de entrada de cargas de tráfico, características geométricas de eje de rueda y cargas originada por el gradiente de temperatura actuante en la losa



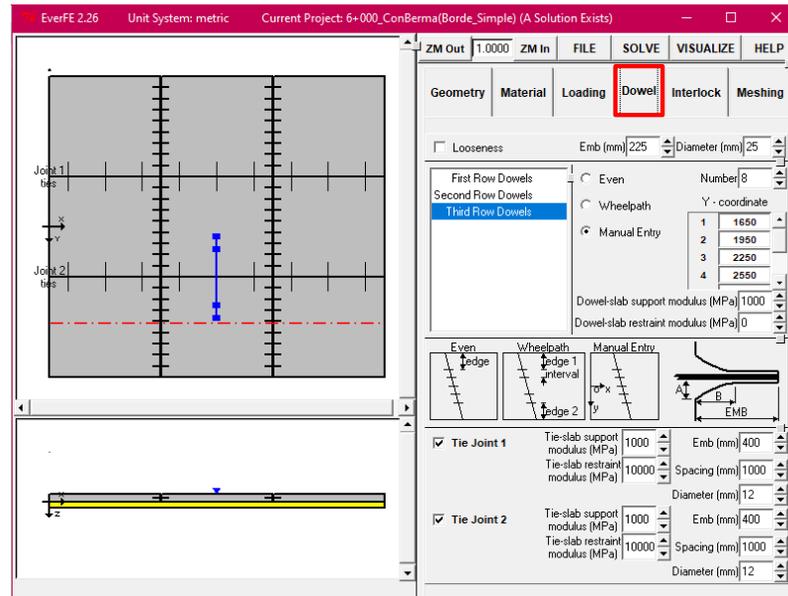
Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Dovelas o pasadores

La ubicación de las dovelas y barras de amarre se puede especificar de tres maneras diferentes: espaciados uniformemente a través de una unión transversal, ubicados en las trayectorias de las ruedas, o ubicados manualmente ingresando las coordenadas (x, y, z).

El diámetro de las dovelas (barras lisas) son de 25 mm, longitud de 45 cm c/30 cm. Las barras de amarre corrugadas tienen un diámetro de 12 mm, una longitud de 80 cm c/100 cm en el interior de las losas y c/50cm en las juntas transversales.

Figura 38. Panel de modelado de dovelas y pasadores



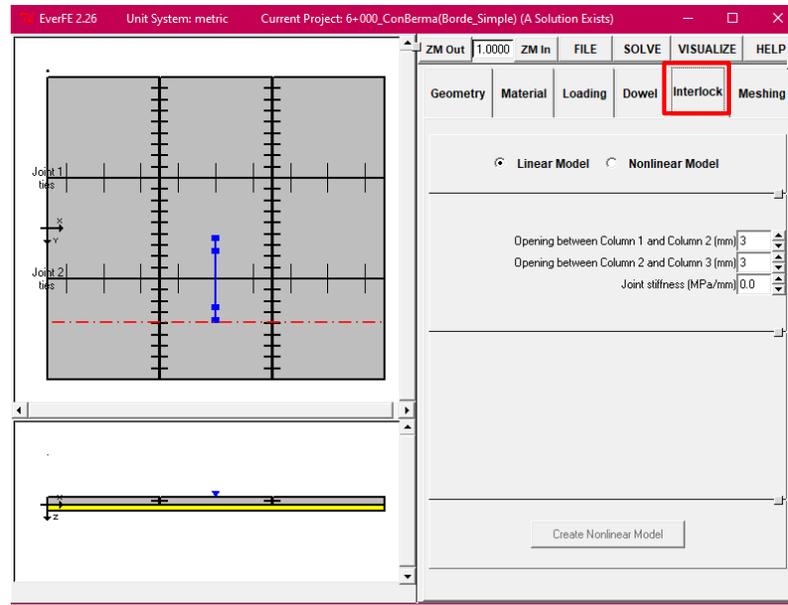
Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Trabazón de agregados

EverFE tiene dos opciones básicas para especificar el comportamiento de trabazón de agregado en uniones transversales: un modelo lineal y un modelo no lineal. Cualquiera de estas opciones se selecciona con la casilla de verificación correspondiente en la parte superior del panel Interlock; el modelo predeterminado es lineal. Independientemente de si se selecciona la opción lineal o no lineal, el modelo de enclavamiento agregado se aplica a todo el ancho de cada junta transversal en el modelo de elementos finitos.

Los valores a utilizar para rigidez en la junta es el valor predeterminado de cero ya que la transferencia de carga se da a través de las dovelas y no por trabazón de agregados y la apertura de las juntas es de 3 mm.

Figura 39. Ventana de definición del modelo de trabazón de agregados y apertura de las juntas



Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

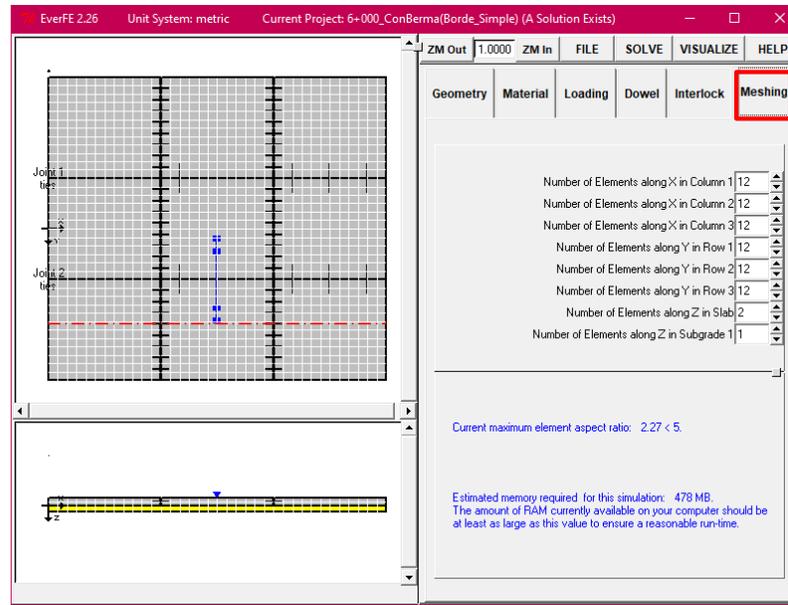
Mallado

Las mallas de elementos finitos generadas por EverFE son rectilíneas. El número de elementos en la dirección x para cada columna de losas y en la dirección y para cada fila de losas se especifican de forma independiente. Además, el usuario también especifica el número de elementos a través del espesor de la losa y cada capa de base / subrasante elástica.

Para el caso en estudio el número de elementos a través del espesor de la losa es bilineal por la simulación del gradiente térmico.

Por lo tanto, la configuración del mallado se establece en 12x12x2. Es importante destacar que mientras más detallado se requiera el análisis mayor el tiempo que tomara el mismo.

Figura 40. Panel de configuración del mallado para el análisis de esfuerzos actuantes en las losas



Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

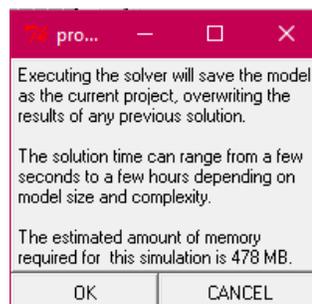
Una vez se ha realizado el ingreso total de los datos, se procede a realizar el análisis.

Resolver

Ejecute el análisis de muestra (Run the Shown Analysis)

Ejecutar el análisis de muestra se selecciona a través del menú Solver, aparecerá un cuadro de diálogo como se muestra a continuación en la figura. El cuadro de diálogo advierte que cualquier solución actual que existe para este proyecto se sobrescribe, además da una estimación de la cantidad de memoria que se requiere para la simulación. En este punto, la iteración se puede cancelar o iniciar haciendo clic en Aceptar (OK).

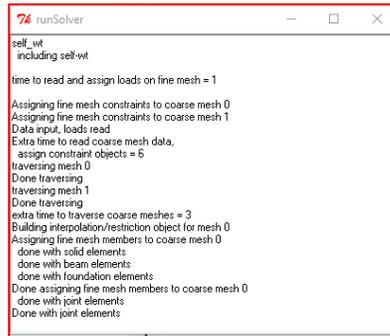
Figura 41. Cuadro de dialogo Ejecutar



Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Al iniciar el análisis, aparecerá una pequeña ventana como la que se observa en la figura 42, donde muestra información sobre el progreso de la solución; esta ventana desaparecerá una vez que se haya completado el análisis.

Figura 42. Cuadro de avance de la solución

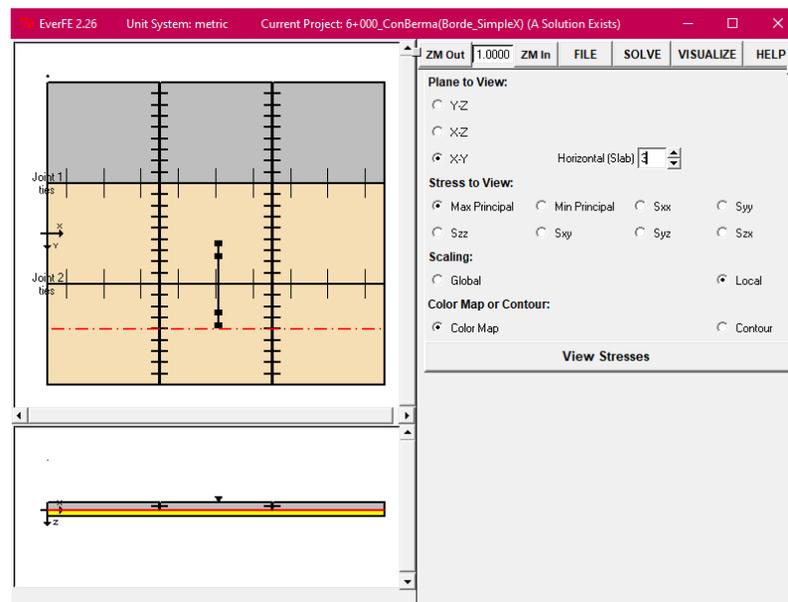


Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Resultados del programa

Para visualizar de forma gráfica los esfuerzos, es necesario seleccionar la opción stresses en el menú Visualizar. Con ello se abre el panel de visualización de la tensión que se muestra a continuación en la Figura 43.

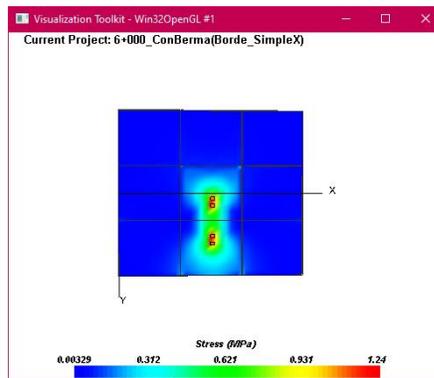
Figura 43. Ventana de visualización de esfuerzos



Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Para ver los esfuerzos en otros planos dentro de la losa el software permite cambiar el plano Horizontal modificando los valores entre 3 (parte inferior) y 7 (parte superior). Para el caso en estudio se analizarán esfuerzos en la parte inferior de la losa, debido a que en la parte inferior se presentan los mayores esfuerzos principales ocasionado por las cargas.

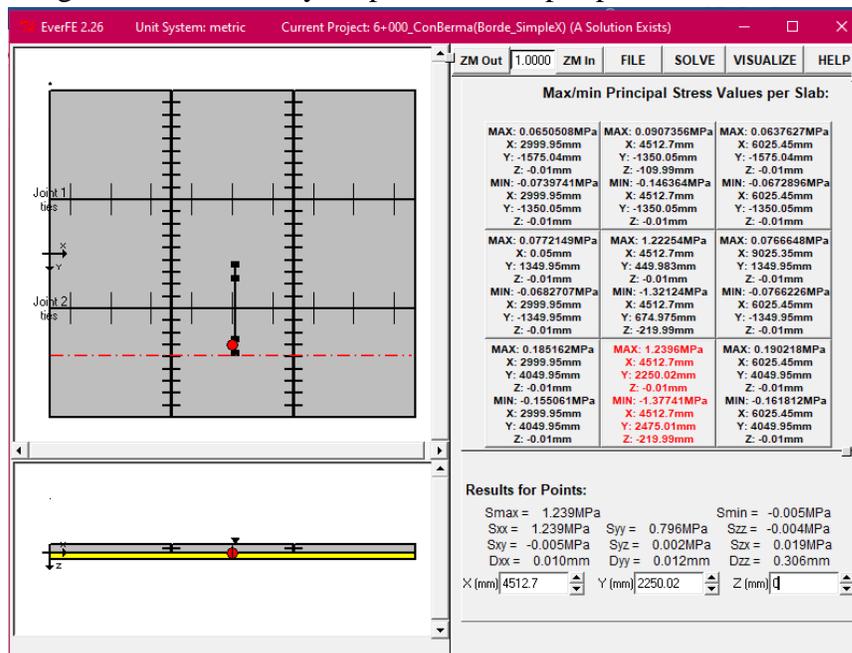
Figura 44. Máximos esfuerzos principales en la cara inferior de las losas



Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

En la figura 45 se puede visualizar los esfuerzos generados en cada losa, donde evidenciamos que el esfuerzo máximo actuante a tracción en el conjunto de losas bajo la carga de eje dual simple es de 1.2396 N/mm^2 , este esfuerzo se sitúa entre la cara interna de la losa y el borde del carril donde se presenta un desplazamiento de 0.306 mm .

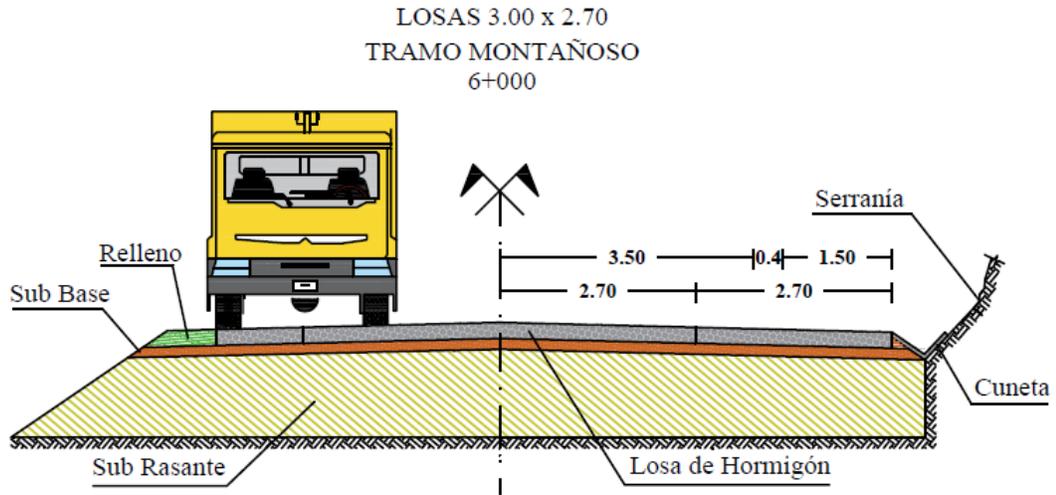
Figura 45. Esfuerzos y desplazamientos por puntos en cada losa



Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

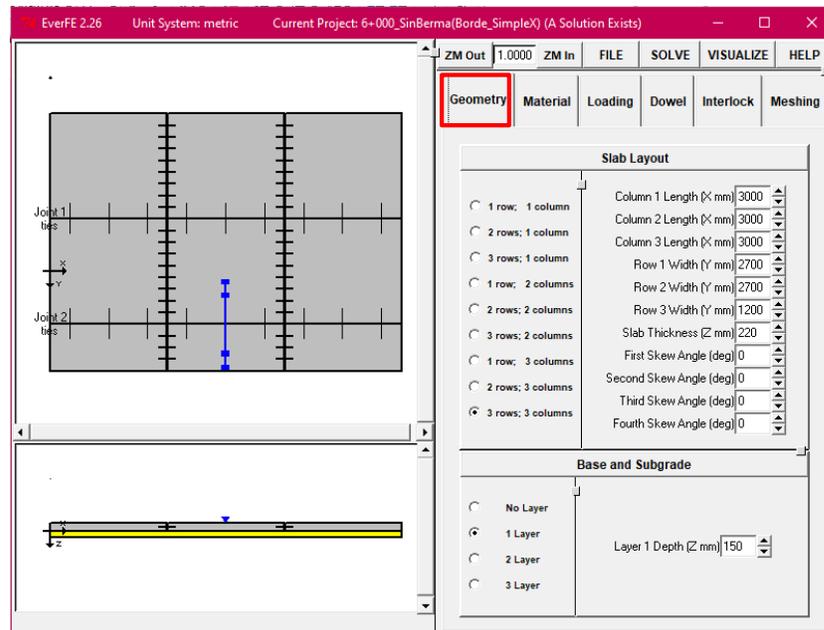
Determinación de la respuesta estructural en la progresiva 6+000, sin considerar el soporte lateral (carril izquierdo):

Figura 46. Sección transversal en la progresiva 6+000 (Sin berma).



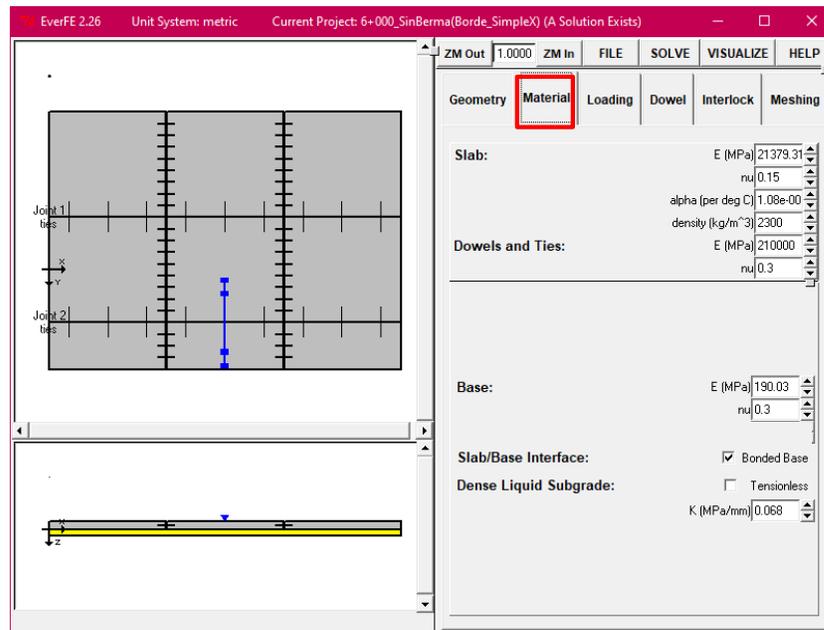
Fuente: Elaboración propia.

Figura 47. Parámetros geométricos del pavimento a modelar



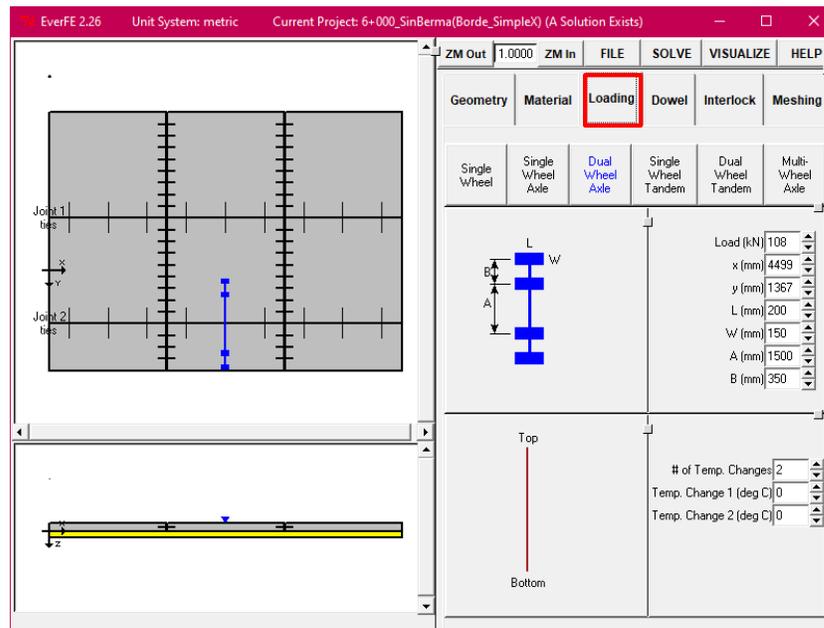
Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Figura 48. Panel de entrada de propiedades mecánicas y estructurales de los materiales de la estructura de pavimento rígido



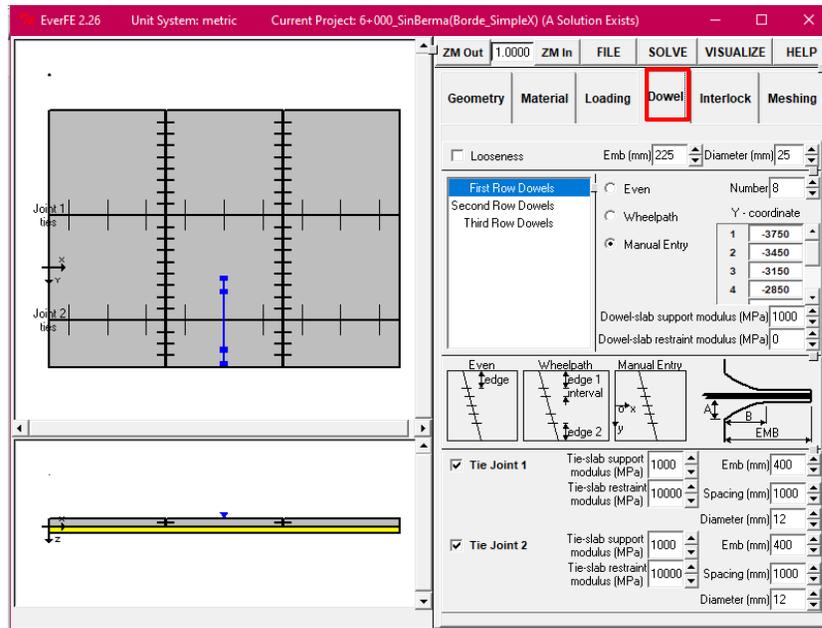
Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Figura 49. Panel de entrada de cargas de tráfico, características geométricas de eje de rueda y cargas originada por el gradiente de temperatura actuante en la losa



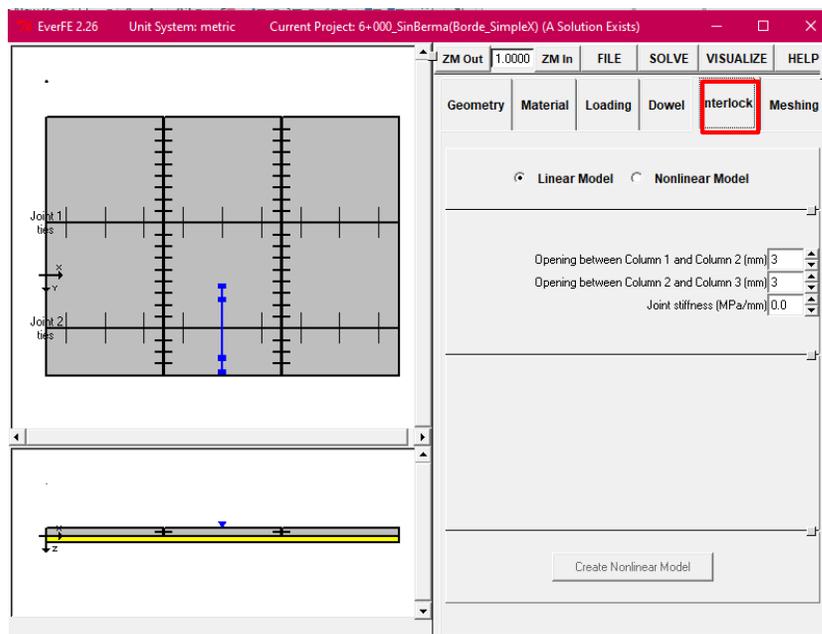
Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Figura 50. Panel de modelado de dovelas y pasadores



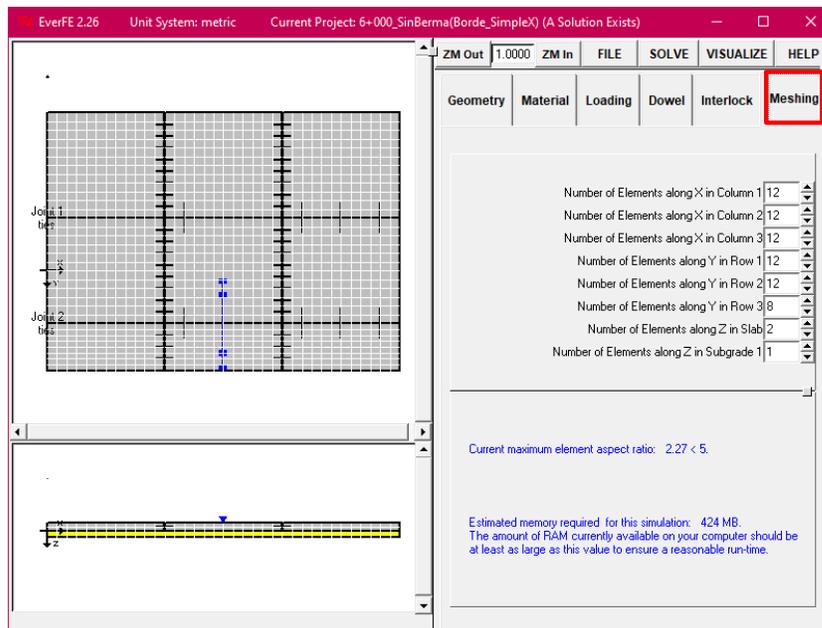
Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Figura 51. Ventana de definición del modelo de trabazón de agregados y abertura de las juntas



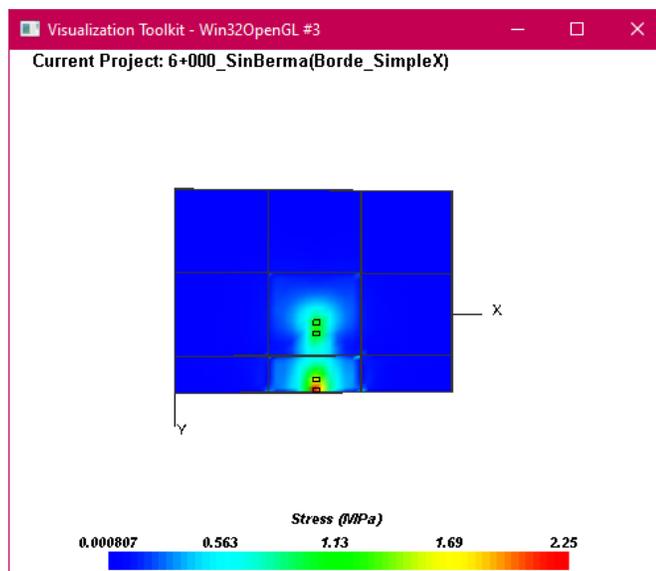
Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Figura 52. Panel de configuración del mallado para el análisis de esfuerzos actuantes en las losas



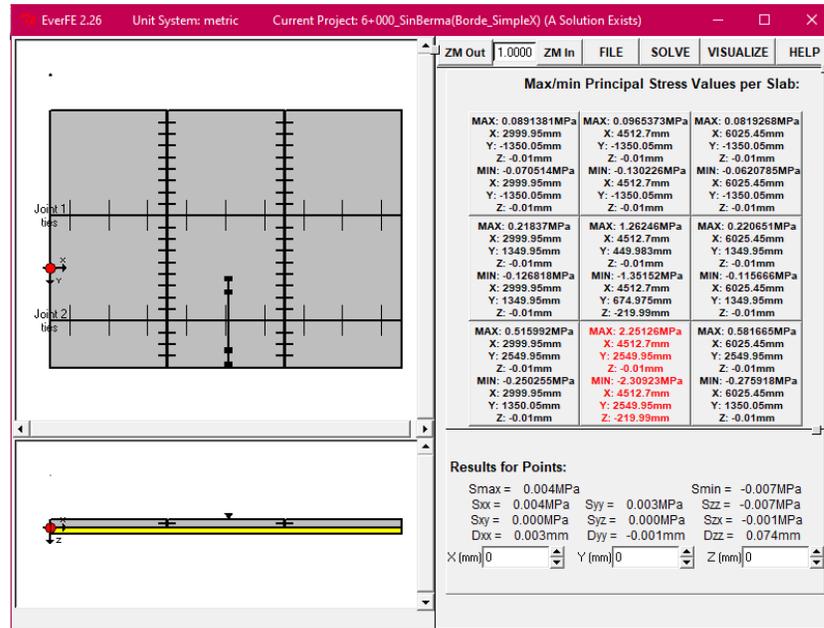
Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Figura 53. Máximos esfuerzos principales en la cara inferior de las losas



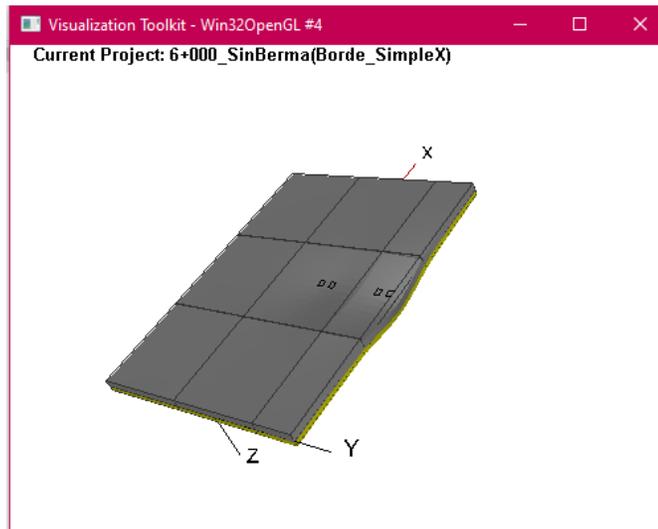
Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Figura 54. Esfuerzos y desplazamientos por puntos en cada losa



Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

Figura 55. Desplazamientos generados en las losas



Fuente: Interfaz del software Ever FE 2.26

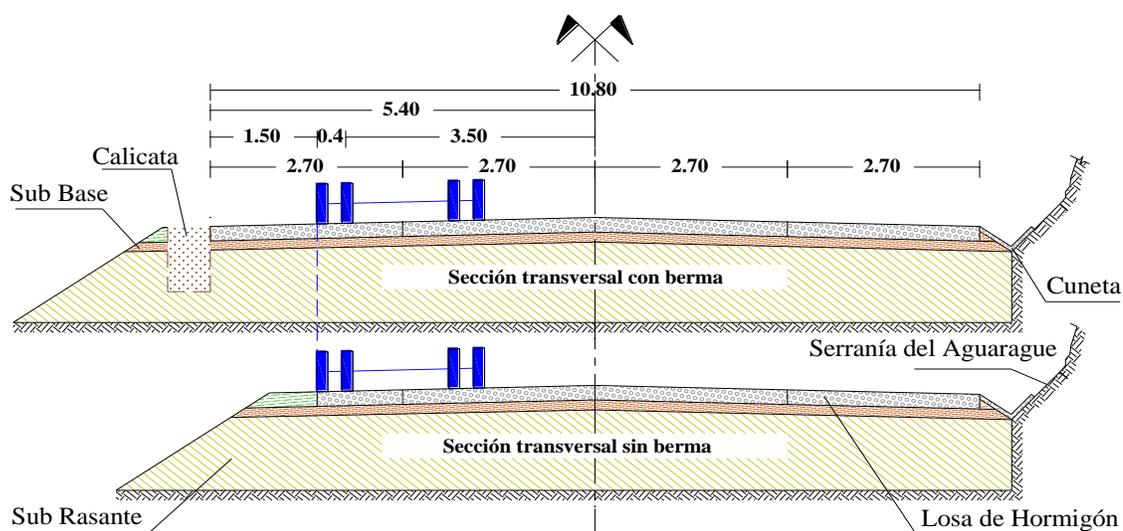
CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos de esfuerzos y deflexiones máximas en el borde y esquina de su respectivo carril, correspondientes a los 5 puntos de estudio simulando al pavimento con y sin la presencia de soporte lateral (berma), bajo las sollicitaciones de carga (cargas por eje y efecto combinado de cargas).

Figura 56. Sección transversal prog. 6+000 del pavimento con y sin soporte lateral



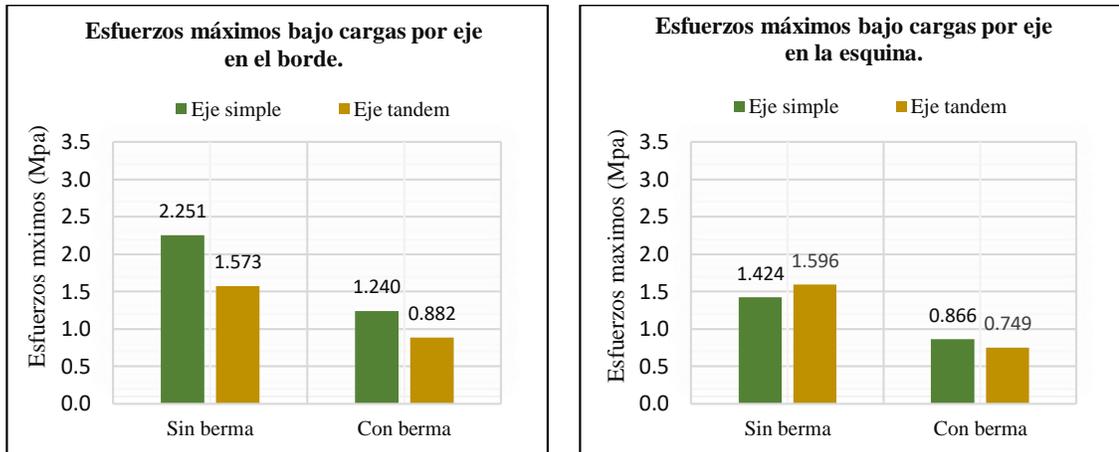
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Resumen de esfuerzos y deflexiones máximas en la prog. 6+000

PROGRESIVA 6+000						
Cargas	Posición	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm²)		Deflexiones máximas (mm)	
			Sin berma	Con berma	Sin berma	Con berma
Por eje	Borde	Simple	2.251	1.240	0.638	0.306
Por eje	Borde	Tándem	1.573	0.882	0.710	0.324
Por eje	Esquina	Simple	1.424	0.866	0.804	0.414
Por eje	Esquina	Tándem	1.596	0.749	0.758	0.371
Por eje + ΔT	Borde	Simple	2.862	1.898	0.634	0.645
Por eje + ΔT	Borde	Tándem	1.889	1.262	0.854	0.739
Por eje + ΔT	Esquina	Simple	1.405	1.323	1.226	0.908
Por eje + ΔT	Esquina	Tándem	1.817	1.338	1.174	0.877

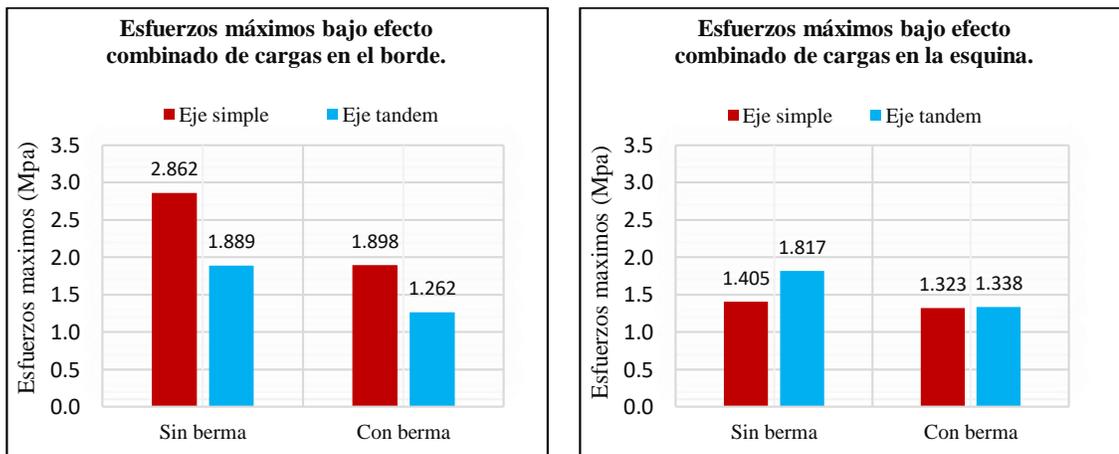
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 14. Esfuerzos máximos generados en la progresiva 6+000 bajo cargas de tránsito en el borde y esquina



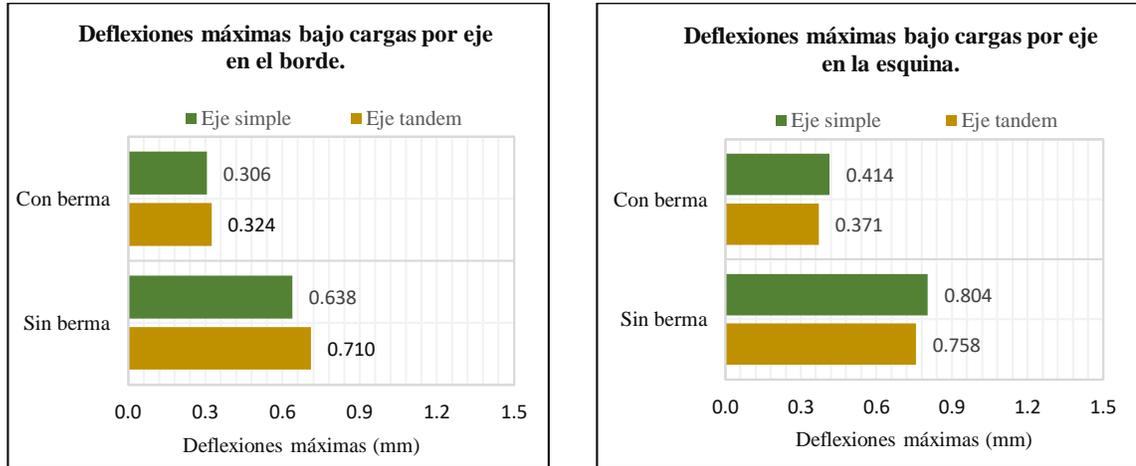
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 15. Esfuerzos máximos generados en la progresiva 6+000 bajo el efecto combinado de cargas en el borde y esquina



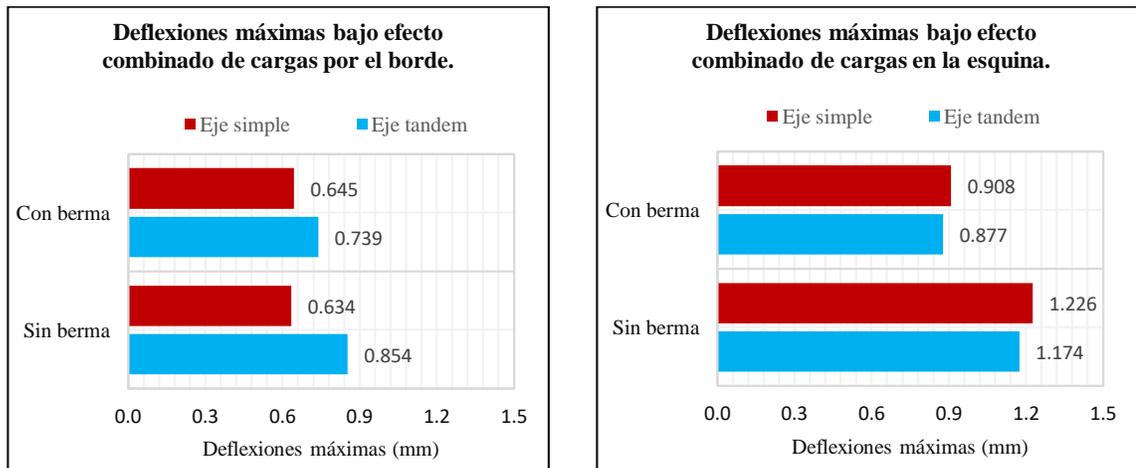
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 16. Deflexiones máximas producidas bajo la acción de cargas de tránsito en la progresiva 6+000



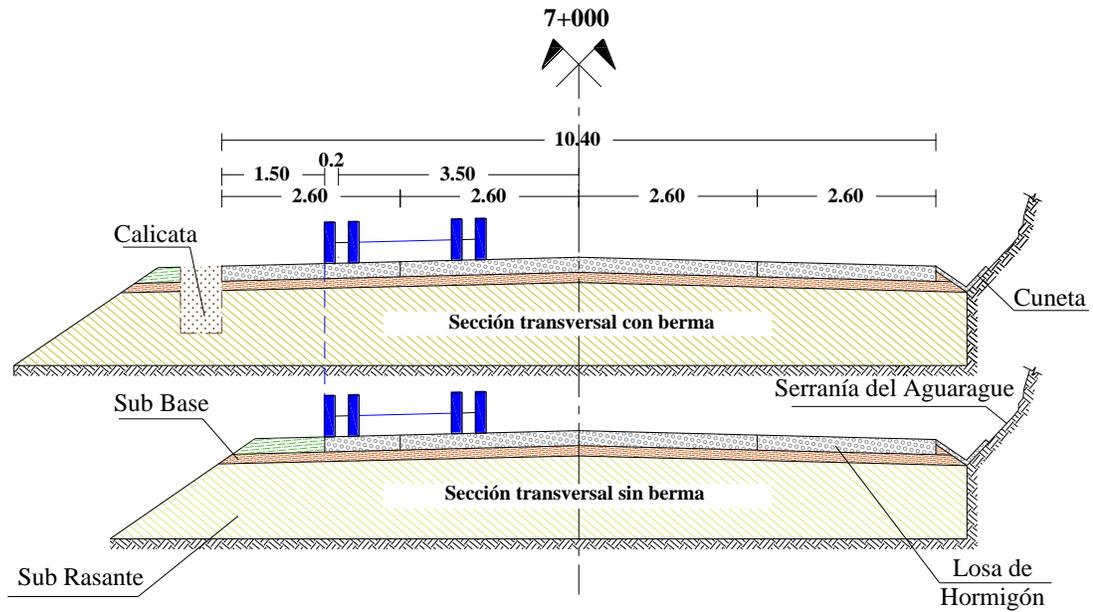
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 17. Deflexiones máximas producidas bajo la acción del efecto combinado de cargas en la progresiva 6+000



Fuente: Elaboración propia.

Figura 57. Sección transversal prog. 7+000 del pavimento con y sin soporte lateral



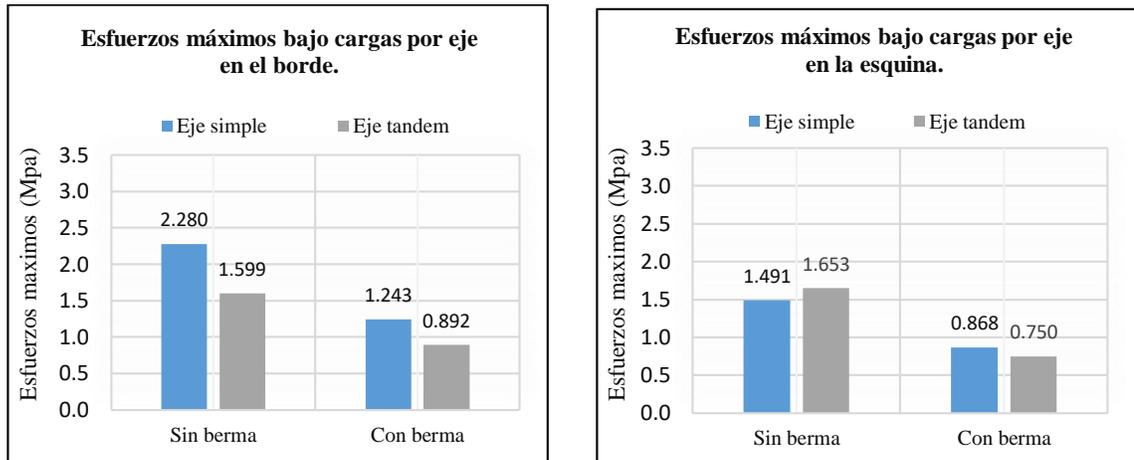
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Resumen de esfuerzos y deflexiones máximas en la prog. 7+000

PROGRESIVA 7+000						
Cargas	Posición	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm ²)		Deflexiones máximas (mm)	
			Sin berma	Con berma	Sin berma	Con berma
Por eje	Borde	Simple	2.280	1.243	0.681	0.313
Por eje	Borde	Tándem	1.599	0.892	0.763	0.333
Por eje	Esquina	Simple	1.491	0.868	0.856	0.424
Por eje	Esquina	Tándem	1.653	0.750	0.812	0.380
Por eje + ΔT	Borde	Simple	2.842	1.874	0.677	0.673
Por eje + ΔT	Borde	Tándem	1.904	1.261	0.910	0.763
Por eje + ΔT	Esquina	Simple	1.391	1.232	1.298	0.935
Por eje + ΔT	Esquina	Tándem	1.820	1.310	1.259	0.903

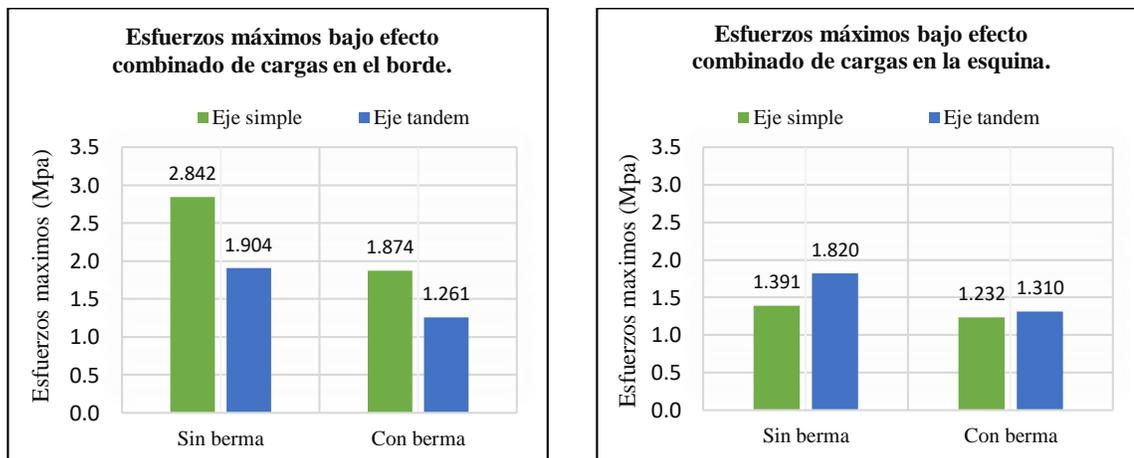
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 18. Esfuerzos máximos generados en la progresiva 7+000 bajo cargas de tránsito en el borde y esquina



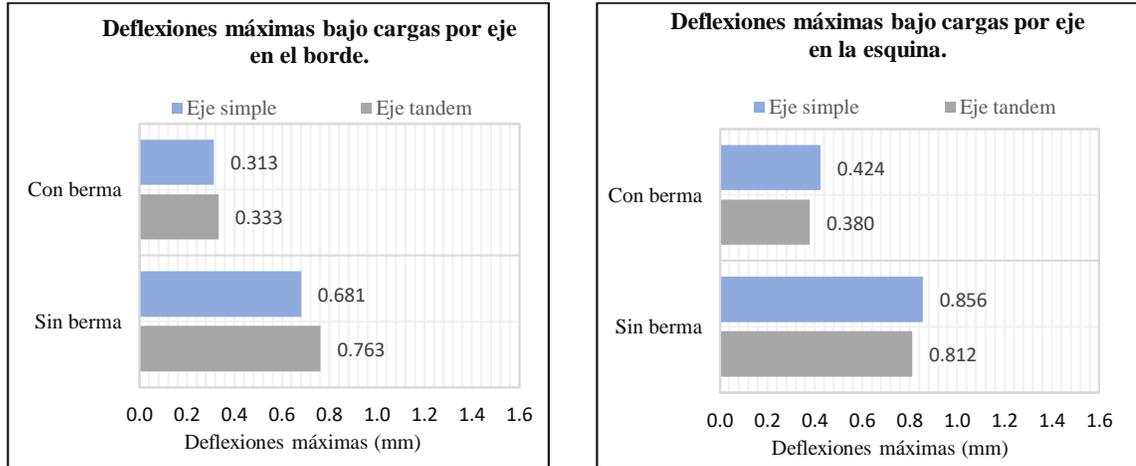
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 19. Esfuerzos máximos generados en la progresiva 7+000 bajo el efecto combinado de cargas en el borde y esquina



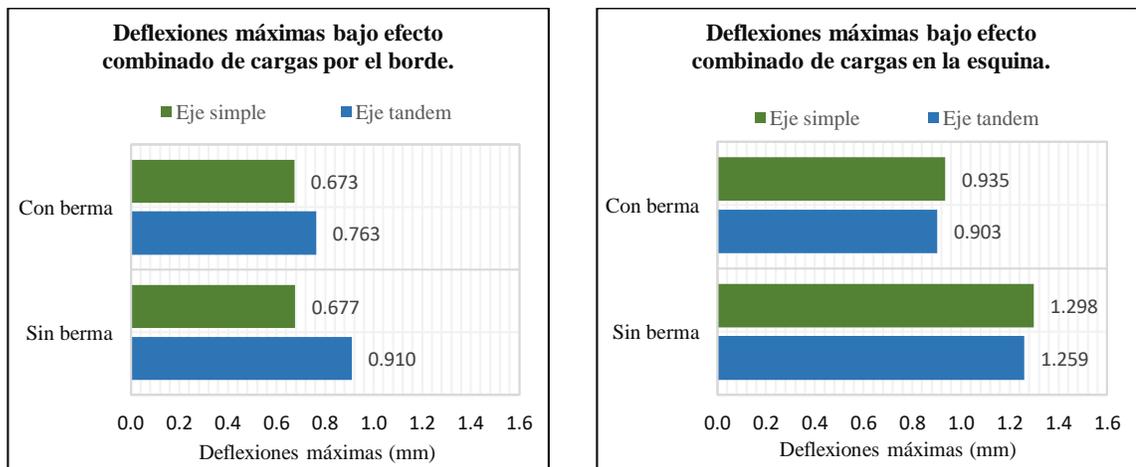
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 20. Deflexiones máximas producidas bajo la acción de cargas de tránsito en la progresiva 7+000



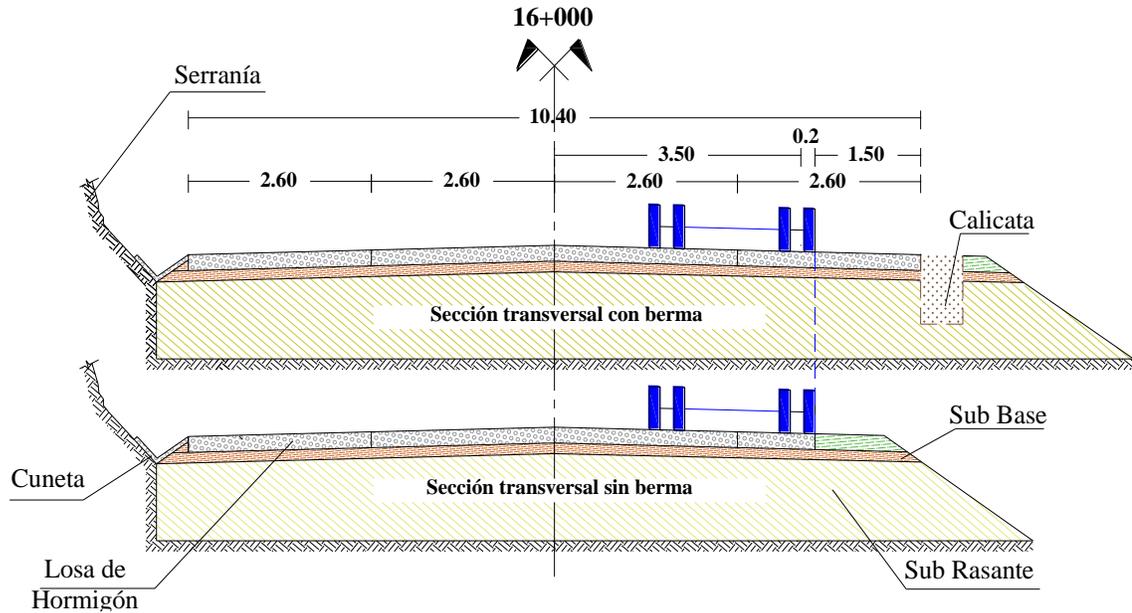
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 21. Deflexiones máximas producidas bajo la acción del efecto combinado de cargas en la progresiva 7+000



Fuente: Elaboración propia.

Figura 58. Sección transversal prog. 16+000 del pavimento con y sin soporte lateral



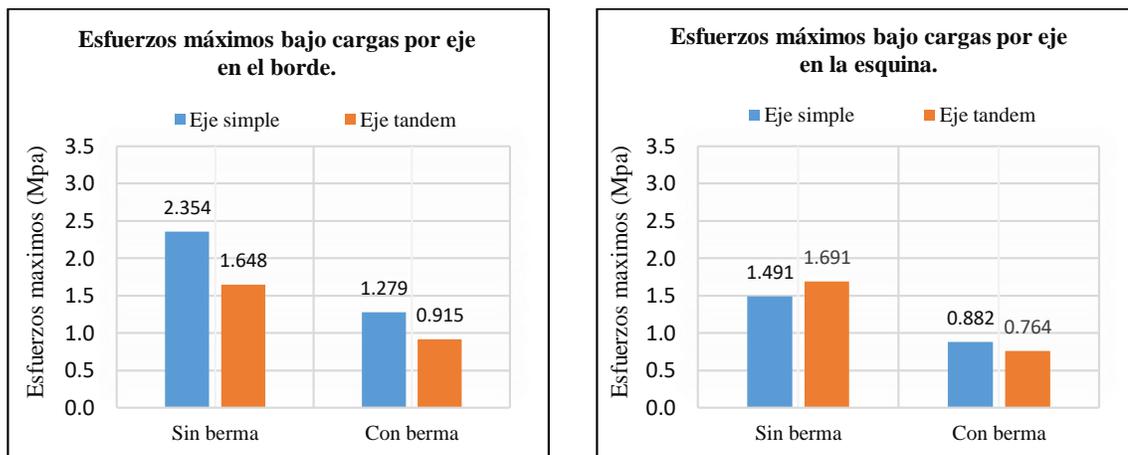
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Resumen de esfuerzos y deflexiones máximas en la prog. 16+000

PROGRESIVA 16+000						
Cargas	Posición	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm ²)		Deflexiones máximas (mm)	
			Sin berma	Con berma	Sin berma	Con berma
Por eje	Borde	Simple	2.354	1.279	0.756	0.352
Por eje	Borde	Tándem	1.648	0.915	0.863	0.384
Por eje	Esquina	Simple	1.491	0.882	0.957	0.478
Por eje	Esquina	Tándem	1.691	0.764	0.921	0.435
Por eje + ΔT	Borde	Simple	2.859	1.849	0.760	0.716
Por eje + ΔT	Borde	Tándem	1.915	1.249	1.021	0.820
Por eje + ΔT	Esquina	Simple	1.394	1.213	1.427	1.005
Por eje + ΔT	Esquina	Tándem	1.809	1.271	1.392	0.975

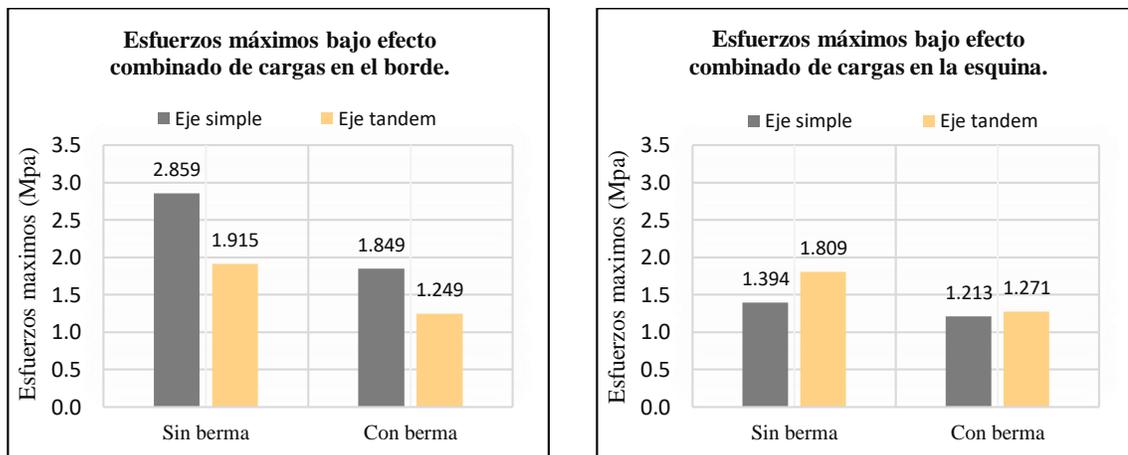
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 22. Esfuerzos máximos generados en la progresiva 16+000 bajo cargas de tránsito en el borde y esquina



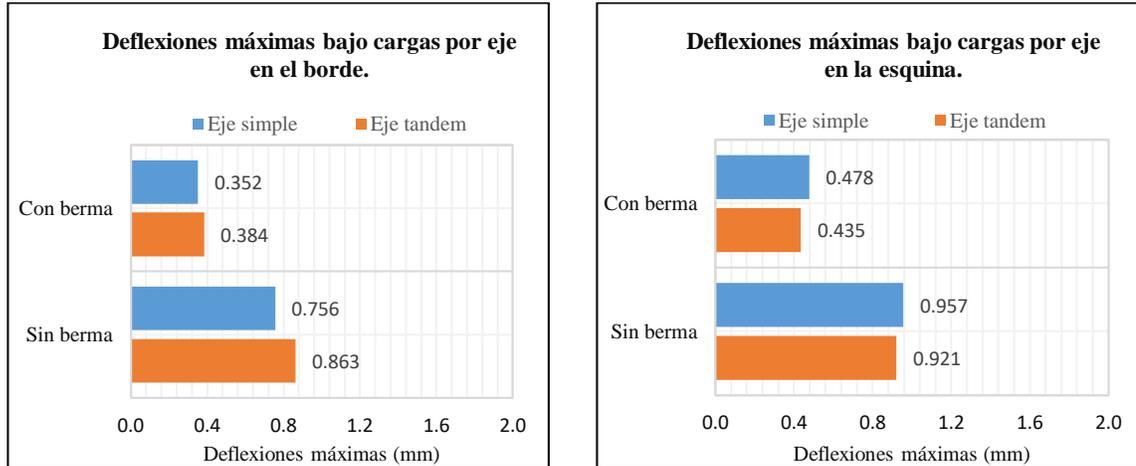
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 23. Esfuerzos máximos generados en la progresiva 16+000 bajo el efecto combinado de cargas en el borde y esquina



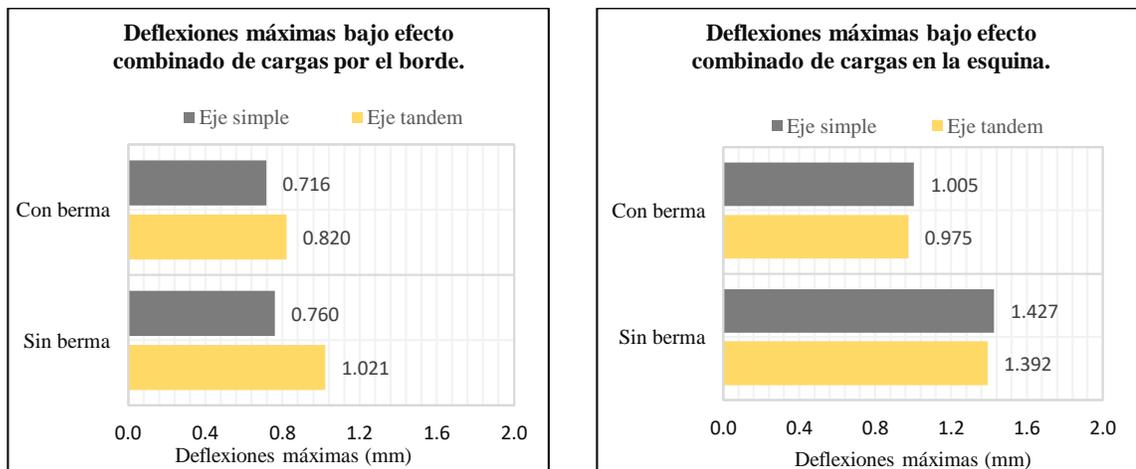
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 24. Deflexiones máximas producidas bajo la acción de cargas de tránsito en la progresiva 16+000



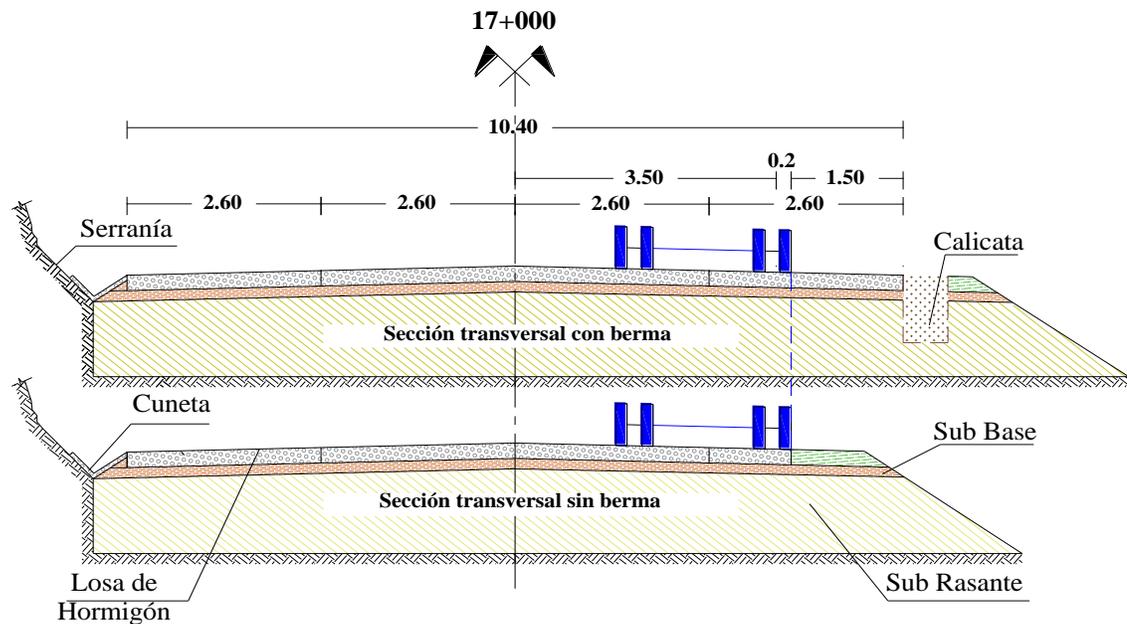
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 25. Deflexiones máximas producidas bajo la acción del efecto combinado de cargas en la progresiva 16+000



Fuente: Elaboración propia.

Figura 59. Sección transversal prog. 17+000 del pavimento con y sin soporte lateral



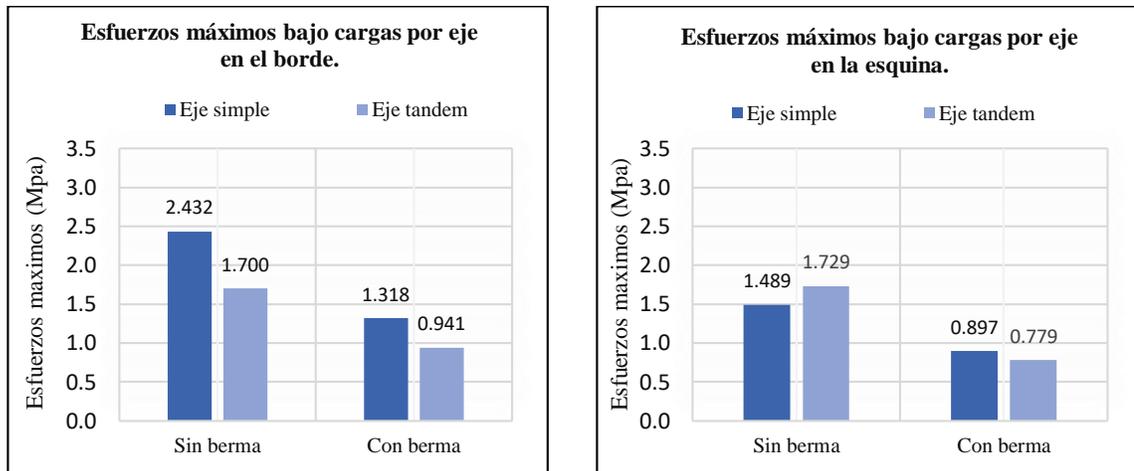
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Resumen de esfuerzos y deflexiones máximas en la prog. 17+000

PROGRESIVA 17+000						
Cargas	Posición	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm ²)		Deflexiones máximas (mm)	
			Sin berma	Con berma	Sin berma	Con berma
Por eje	Borde	Simple	2.432	1.318	0.845	0.399
Por eje	Borde	Tándem	1.700	0.941	0.984	0.449
Por eje	Esquina	Simple	1.489	0.897	1.079	0.544
Por eje	Esquina	Tándem	1.729	0.779	1.054	0.504
Por eje + ΔT	Borde	Simple	2.880	1.827	0.859	0.766
Por eje + ΔT	Borde	Tándem	1.929	1.240	1.149	0.886
Por eje + ΔT	Esquina	Simple	1.402	1.199	1.583	1.091
Por eje + ΔT	Esquina	Tándem	1.799	1.237	1.553	1.060

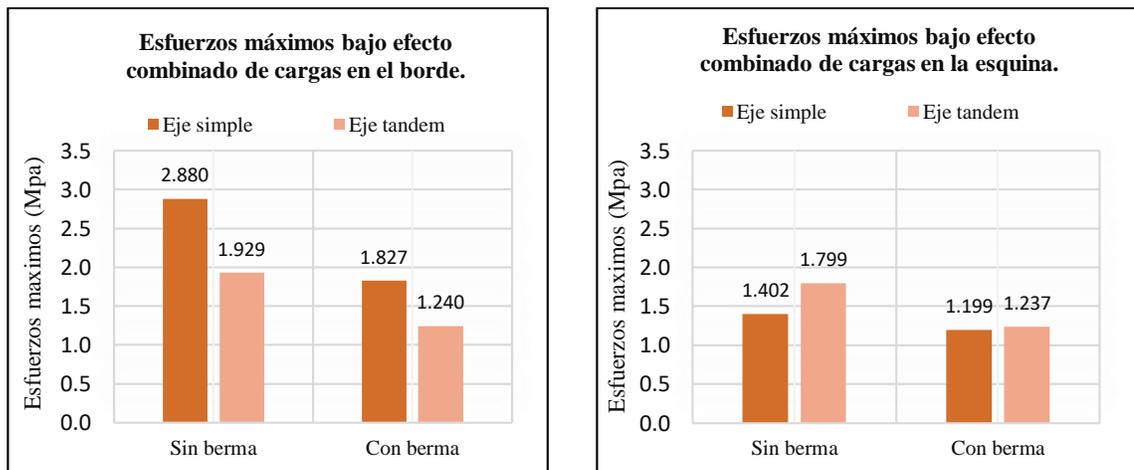
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 26. Esfuerzos máximos generados en la progresiva 17+000 bajo cargas de tránsito en el borde y esquina



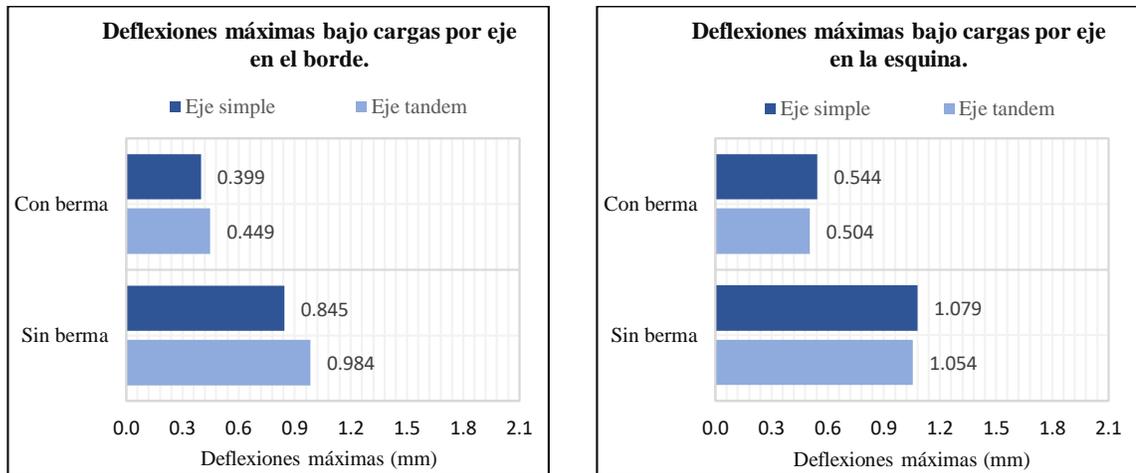
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 27. Esfuerzos máximos generados en la progresiva 17+000 bajo el efecto combinado de cargas en el borde y esquina



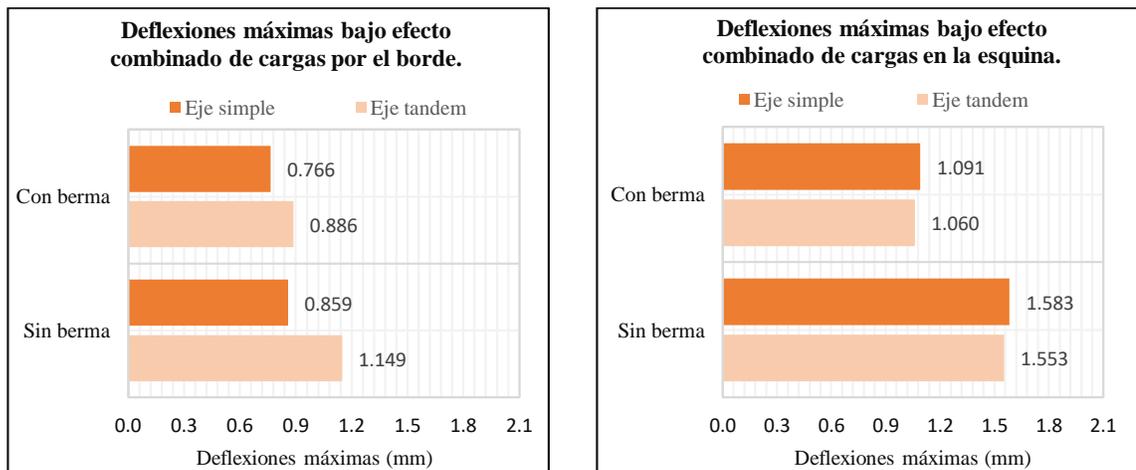
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 28. Deflexiones máximas producidas bajo la acción de cargas de tránsito en la progresiva 17+000



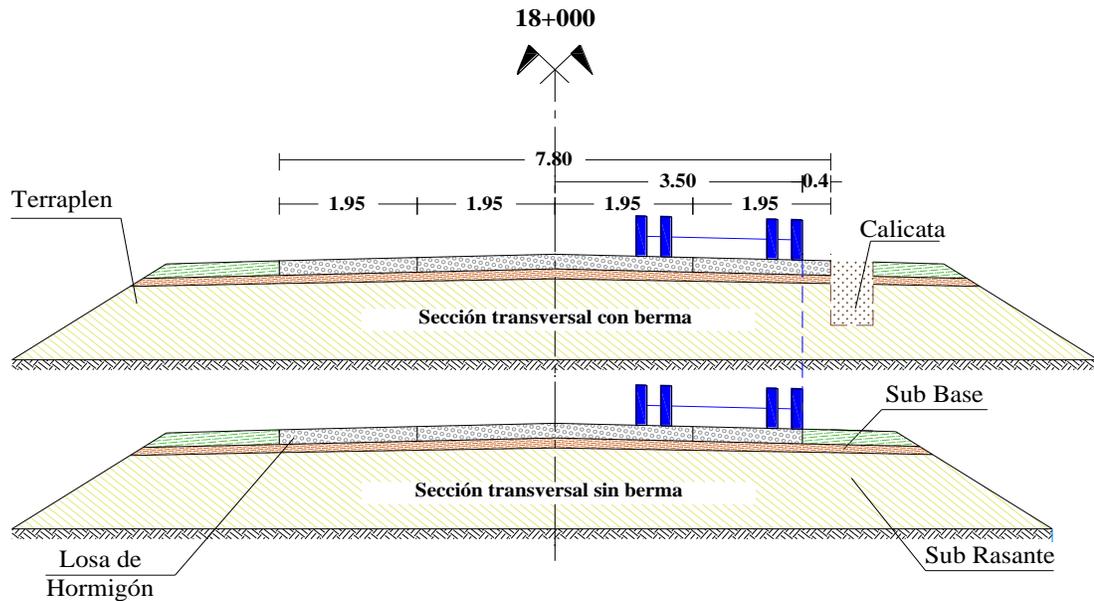
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 29. Deflexiones máximas producidas bajo la acción del efecto combinado de cargas en la progresiva 17+000



Fuente: Elaboración propia.

Figura 60. Sección transversal prog. 18+000 del pavimento con y sin soporte lateral



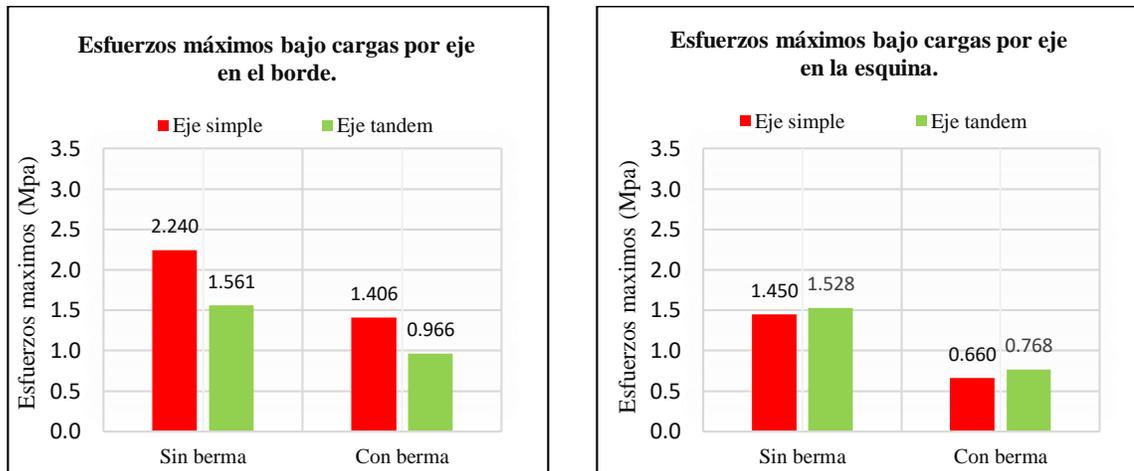
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Resumen de esfuerzos y deflexiones máximas en la prog. 18+000

PROGRESIVA 18+000						
Cargas	Posición	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm ²)		Deflexiones máximas (mm)	
			Sin berma	Con berma	Sin berma	Con berma
Por eje	Borde	Simple	2.240	1.406	0.646	0.396
Por eje	Borde	Tándem	1.561	0.966	0.707	0.433
Por eje	Esquina	Simple	1.450	0.660	0.827	0.556
Por eje	Esquina	Tándem	1.528	0.768	0.764	0.488
Por eje + ΔT	Borde	Simple	2.801	1.966	0.687	0.667
Por eje + ΔT	Borde	Tándem	1.866	1.281	0.910	0.799
Por eje + ΔT	Esquina	Simple	1.371	0.733	1.303	1.088
Por eje + ΔT	Esquina	Tándem	1.783	1.291	1.240	1.025

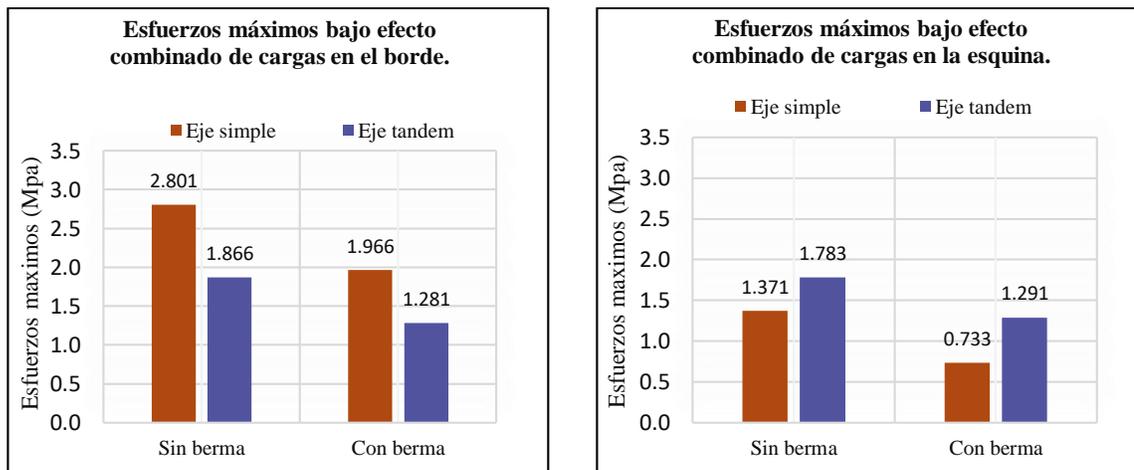
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 30. Esfuerzos máximos generados en la progresiva 18+000 bajo cargas de tránsito en el borde y esquina.



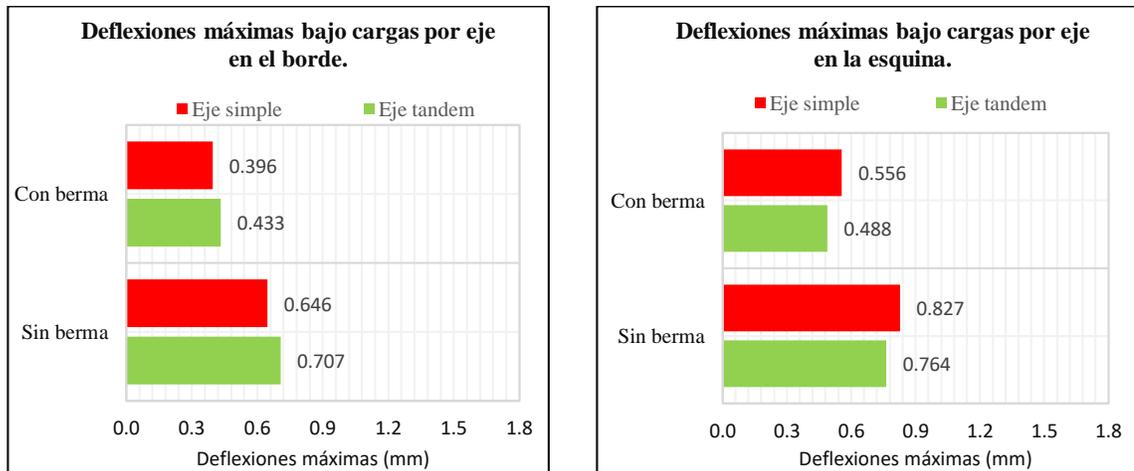
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 31. Esfuerzos máximos generados en la progresiva 18+000 bajo el efecto combinado de cargas en el borde y esquina



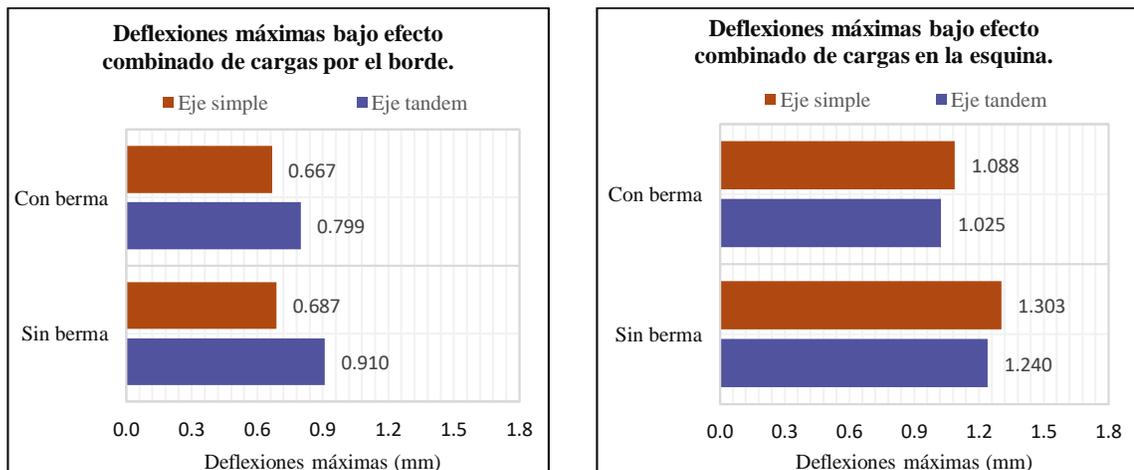
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 32. Deflexiones máximas producidas bajo la acción de cargas de tránsito en la progresiva 18+000



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 33. Deflexiones máximas producidas bajo la acción del efecto combinado de cargas en la progresiva 18+000



Fuente: Elaboración propia.

4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE CONTROL DE DISEÑO ESTRUCTURAL POR FATIGA

El modelo de fatiga de la teoría de Miner indica que, si la tensión máxima en la posición crítica es menor que el 50% del módulo rotura del hormigón, el pavimento podrá soportar infinitas repeticiones de carga, si la tensión máxima sobrepasa este criterio de control, la losa de hormigón presentaría fallas por fisuramiento debilitando así a la estructura y en consecuencia reduciendo su desempeño estructural.

En el presente análisis el parámetro de control es el módulo de rotura del hormigón valor procedente de las especificaciones técnicas del diseño original, donde establece que para el proyecto de pavimentación del tramo Campo Pajoso - Caraparí, la resistencia promedio a la flexión (módulo de rotura) a los 28 días debe ser de 4.3 N/mm² (Mpa).

En las siguientes tablas se detallan los esfuerzos máximos obtenidos de los distintos escenarios modelados en cada progresiva y se comparan con el criterio de control estructural por fatiga.

Tabla 28. Análisis de las tensiones máximas producidas en el carril izquierdo del pavimento correspondiente a la progresiva 6+000 bajo el criterio de falla por fatiga

6+000 CARRIL IZQUIERDO								
Cargas	Posición de la carga	Espesor de losa (cm)	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm ²)		MR (N/mm ²)	Modelo de fatiga Esf. máx. < 50 % MR	
				Sin berma	Con berma		Sin berma	Con berma
Por eje	Borde	22	Simple	2.251	1.240	4.3	52.3 %	28.8 %
Por eje	Borde	22	Tándem	1.573	0.882	4.3	36.6 %	20.5 %
Por eje	Esquina	22	Simple	1.424	0.866	4.3	33.1 %	20.1 %
Por eje	Esquina	22	Tándem	1.596	0.749	4.3	37.1 %	17.4 %
Por eje + ΔT	Borde	22	Simple	2.862	1.898	4.3	66.6 %	44.1 %
Por eje + ΔT	Borde	22	Tándem	1.889	1.262	4.3	43.9 %	29.3 %
Por eje + ΔT	Esquina	22	Simple	1.405	1.323	4.3	32.7 %	30.8 %
Por eje + ΔT	Esquina	22	Tándem	1.817	1.338	4.3	42.3 %	31.1 %

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que en los casos de pavimento sin berma en la sección de la progresiva 6+000 carril izquierdo, la estructura fallaría bajo 2 escenarios donde las solicitaciones de carga están dadas por (eje Simple, eje simple + ΔT), ubicadas en el borde del carril y la cara inferior de la losa. Y al considerar la presencia del soporte lateral la estructura resiste satisfactoriamente todos los escenarios impuestos.

Tabla 29. Análisis de las tensiones máximas producidas en el carril izquierdo del pavimento correspondiente a la progresiva 7+000 bajo el criterio de falla por fatiga

7+000 IZQUIERDO								
Cargas	Posición de la carga	Espesor de losa (cm)	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm ²)		MR (N/mm ²)	Modelo de fatiga Esf. máx. < 50 % MR	
				Sin berma	Con berma		Sin berma	Con berma
Por eje	Borde	22	Simple	2.280	1.243	4.3	53.0 %	28.9 %
Por eje	Borde	22	Tándem	1.599	0.892	4.3	37.2 %	20.7 %
Por eje	Esquina	22	Simple	1.491	0.868	4.3	34.7 %	20.2 %
Por eje	Esquina	22	Tándem	1.653	0.750	4.3	38.4 %	17.4 %
Por eje + ΔT	Borde	22	Simple	2.842	1.874	4.3	66.1 %	43.6 %
Por eje + ΔT	Borde	22	Tándem	1.904	1.261	4.3	44.3 %	29.3 %
Por eje + ΔT	Esquina	22	Simple	1.391	1.232	4.3	32.3 %	28.7 %
Por eje + ΔT	Esquina	22	Tándem	1.820	1.310	4.3	42.3 %	30.5 %

Fuente: Elaboración propia.

En la sección de la progresiva 7+000 carril izquierdo, podemos identificar que de igual manera ante las condiciones de pavimento sin soporte lateral la estructura presentaría fallas por fisuramiento al no cumplir con el criterio de falla por fatiga, ante la presencia de cargas por (eje simple, eje simple + ΔT) en el borde del carril.

Tabla 30. Análisis de las tensiones máximas producidas en el carril derecho del pavimento correspondiente a la progresiva 16+000 bajo el criterio de falla por fatiga

16+000 CARRIL DERECHO								
Cargas	Posición de la carga	Espesor de losa (cm)	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm ²)		MR (N/mm ²)	Modelo de fatiga Esf. máx. < 50 % MR	
				Sin berma	Con berma		Sin berma	Con berma
Por eje	Borde	22	Simple	2.354	1.279	4.3	54.7 %	29.7 %
Por eje	Borde	22	Tándem	1.648	0.915	4.3	38.3 %	21.3 %
Por eje	Esquina	22	Simple	1.491	0.882	4.3	34.7 %	20.5 %
Por eje	Esquina	22	Tándem	1.691	0.764	4.3	39.3 %	17.8 %
Por eje + ΔT	Borde	22	Simple	2.859	1.849	4.3	66.5 %	43.0 %
Por eje + ΔT	Borde	22	Tándem	1.915	1.249	4.3	44.5 %	29.0 %
Por eje + ΔT	Esquina	22	Simple	1.394	1.213	4.3	32.4 %	28.2 %
Por eje + ΔT	Esquina	22	Tándem	1.809	1.271	4.3	42.1 %	29.6 %

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al análisis de falla por fatiga del pavimento efectuado en el carril derecho de la progresiva 16+000, podemos observar que sin la presencia del soporte lateral se presentan dos escenarios críticos, en el borde del carril bajo cargas por (eje simple, eje simple + ΔT) que superan el 50% del módulo de rotura induciendo así la falla por fisuramiento. En todos los demás escenarios se cumple el criterio de falla por fatiga, más aún cuando se considera el soporte lateral.

Tabla 31. Análisis de las tensiones máximas producidas en el carril derecho del pavimento correspondiente a la progresiva 17+000 bajo el criterio de falla por fatiga

17+000 CARRIL DERECHO								
Cargas	Posición de la carga	Espesor de losa (cm)	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm ²)		MR (N/mm ²)	Modelo de fatiga Esf. máx. < 50 % MR	
				Sin berma	Con berma		Sin berma	Con berma
Por eje	Borde	22	Simple	2.432	1.318	4.3	56.6 %	30.7 %
Por eje	Borde	22	Tándem	1.700	0.941	4.3	39.5 %	21.9 %
Por eje	Esquina	22	Simple	1.489	0.897	4.3	34.6 %	20.9 %
Por eje	Esquina	22	Tándem	1.729	0.779	4.3	40.2 %	18.1 %
Por eje + ΔT	Borde	22	Simple	2.880	1.827	4.3	67.0 %	42.5 %
Por eje + ΔT	Borde	22	Tándem	1.929	1.240	4.3	44.9 %	28.8 %
Por eje + ΔT	Esquina	22	Simple	1.402	1.199	4.3	32.6 %	27.9 %
Por eje + ΔT	Esquina	22	Tándem	1.799	1.237	4.3	41.8 %	28.8 %

Fuente: Elaboración propia.

De todos los escenarios simulados sobre el carril derecho en la sección de la progresiva 17+000, se presentan de igual manera dos escenarios desfavorables coincidiendo estas en la posición de la carga ubicado en el borde del carril, bajo los tipos de cargas por (eje simple, eje simple + ΔT), estos dos escenarios de falla por fatiga se presentan en las condiciones de sin soporte lateral, también se puede observar en los resultados que bajo todas las simulaciones aplicadas al pavimento lateralmente soportado este resiste satisfactoriamente ante una posible falla por fatiga.

Tabla 32. Análisis de las tensiones máximas producidas en el carril derecho del pavimento correspondiente a la progresiva 18+000 bajo el criterio de falla por fatiga

18+000 CARRIL DERECHO								
Cargas	Posición de la carga	Espesor de losa (cm)	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm ²)		MR (N/mm ²)	Modelo de fatiga Esf. máx. < 50 % MR	
				Sin berma	Con berma		Sin berma	Con berma
Por eje	Borde	22	Simple	2.240	1.406	4.3	52.1 %	32.7 %
Por eje	Borde	22	Tándem	1.561	0.966	4.3	36.3 %	22.5 %
Por eje	Esquina	22	Simple	1.450	0.660	4.3	33.7 %	15.3 %
Por eje	Esquina	22	Tándem	1.528	0.768	4.3	35.5 %	17.9 %
Por eje + ΔT	Borde	22	Simple	2.801	1.966	4.3	65.1 %	45.7 %
Por eje + ΔT	Borde	22	Tándem	1.866	1.281	4.3	43.4 %	29.8 %
Por eje + ΔT	Esquina	22	Simple	1.371	0.733	4.3	31.9 %	17.0 %
Por eje + ΔT	Esquina	22	Tándem	1.783	1.291	4.3	41.5 %	30.0 %

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de las simulaciones aplicadas sobre el carril derecho en la sección de la progresiva 18+000, se observa que definitivamente el tipo de carga más desfavorable es la de Eje simple 108 KN, con la ubicación de su eje en el borde del carril.

4.3 OPTIMIZACIÓN DEL ESPESOR DE LAS LOSAS DE CONCRETO LATERALMENTE SOPORTADO

Teniendo en cuenta las condiciones del diseño existente en cada punto de estudio se identificó y analizó bajo el criterio de falla por fatiga los escenarios más desfavorables reduciendo el espesor de las losas, hasta que presente fallas por fisuramiento.

De acuerdo a las condiciones reales se identificó que el espesor de las losas de pavimento del tramo Campo Pajoso – Caraparí es de 22 cm, y que en cada punto de estudio el pavimento cuenta con soporte lateral (berma adherida), del mismo material y espesor que las losas. Partiendo de la respuesta estructural teórica del pavimento lateralmente soportado, obtenidas en cada uno de los puntos de estudio bajo los distintos escenarios (tipos de cargas y posición de los ejes en las losas), se pudo evidenciar en los resultados que el pavimento en cada una de las progresivas cumple con el criterio de falla por fatiga garantizando de acuerdo a la teoría de Miner, que el pavimento puede soportar infinitas repeticiones de carga.

Dentro de estos resultados se presenta un patrón de comportamiento similar en cada progresiva siendo este generado por la carga del eje Dual Simple 108 KN en el borde de las losas. Es decir, que el tipo de carga más desfavorable que genera más daño al pavimento es el eje Simple, daño que se incrementa al considerar el gradiente de temperatura.

Entonces con la finalidad de ver hasta que espesor se podía optimizar al pavimento lateralmente soportado en sus respectivas progresivas se identificó los dos esfuerzos más críticos en cada sección de las progresivas, para ser simulados reduciendo el espesor de las losas hasta que la estructura de pavimento falle por fatiga.

En la siguiente tabla se presentará un resumen de los escenarios más críticos que se presentaron en cada progresiva, y que serán simulados reduciendo el espesor de las losas.

Tabla 33. Resumen de los escenarios más críticos en cada progresiva

Cargas	Posición de la carga	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm ²)	MR (N/mm ²)	Modelo de fatiga Esf. Max. < 50 % MR
6+000					
Por eje + ΔT	Borde	Simple	1.898	4.3	44.1 % Cumple
Por eje + ΔT	Esquina	Tándem	1.338	4.3	31.1 % Cumple
7+000					
Por eje + ΔT	Borde	Simple	1.874	4.3	43.6 % Cumple
Por eje + ΔT	Esquina	Tándem	1.310	4.3	30.5 % Cumple
16+000					
Por eje	Borde	Simple	1.279	4.3	29.7 % Cumple
Por eje + ΔT	Borde	Simple	1.849	4.3	43.0 % Cumple

17+000					
Por eje	Borde	Simple	1.318	4.3	30.7 % Cumple
Por eje + ΔT	Borde	Simple	1.827	4.3	42.5 % Cumple
18+000					
Por eje	Borde	Simple	1.406	4.3	32.7 % Cumple
Por eje + ΔT	Borde	Simple	1.966	4.3	45.7 % Cumple

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1 Esfuerzos máximos producidos en el pavimento de hormigón reforzado con un espesor de 21 cm

Se realizó la modelación para cada uno de los escenarios de la tabla 33 reduciendo el espesor del pavimento a 21 cm, como resultado de ello todos los esfuerzos aumentaron de tal manera que aplicándoles el criterio de falla por fatiga los resultados reflejan que pese al incremento cada uno de los esfuerzos se encuentran dentro del rango permitido, lo que nos permite afirmar que el pavimento con un espesor de 21 cm es capaz de soportar infinitas repeticiones de cargas bajo las solicitaciones de cargas impuestas.

Tabla 34. Análisis de las tensiones máximas bajo el criterio de falla por fatiga para un espesor de losas de 21 cm

Cargas	Posición de la carga	Espesor de losa (cm)	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm ²)	MR (N/mm ²)	Modelo de fatiga Esf. Max. < 50 % MR
6+000						
Por eje + ΔT	Borde	21	Simple	2.043	4.3	47.5 % Cumple
Por eje + ΔT	Esquina	21	Tándem	1.449	4.3	33.7 % Cumple
7+000						
Por eje + ΔT	Borde	21	Simple	2.019	4.3	47.0 % Cumple
Por eje + ΔT	Esquina	21	Tándem	1.418	4.3	33.0 % Cumple
16+000						
Por eje	Borde	21	Simple	1.364	4.3	31.7 % Cumple
Por eje + ΔT	Borde	21	Simple	1.993	4.3	46.3 % Cumple
17+000						
Por eje	Borde	21	Simple	1.407	4.3	32.7 % Cumple
Por eje + ΔT	Borde	21	Simple	1.972	4.3	45.9 % Cumple
18+000						
Por eje	Borde	21	Simple	1.493	4.3	34.7 % Cumple
Por eje + ΔT	Borde	21	Simple	2.104	4.3	48.9 % Cumple

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 Esfuerzos máximos producidos en el pavimento de hormigón reforzado con un espesor de 20 cm

Se aplicó el mismo criterio para un espesor de losas de 20 cm, donde los resultados obtenidos indican que este espesor ya no es lo suficientemente capaz de soportar un número infinito de repeticiones de cargas sin que antes se presenten fallas por fisura, en la siguiente tabla podemos identificar que la sollicitación de carga crítica es la de eje Simple en el borde combinada con el gradiente térmico.

Tabla 35. Análisis de las tensiones máximas bajo el criterio de falla por fatiga para un espesor de losas de 20 cm

Cargas	Posición de la carga	Espesor de losa (cm)	Tipo de eje	Esfuerzos máximos (N/mm ²)	MR (N/mm ²)	Modelo de fatiga Esf. Max. < 50 % MR
6+000						
Por eje + ΔT	Borde	20	Simple	2.203	4.3	51 % No cumple
Por eje + ΔT	Esquina	20	Tándem	1.572	4.3	37 % Cumple
7+000						
Por eje + ΔT	Borde	20	Simple	2.177	4.3	51 % No cumple
Por eje + ΔT	Esquina	20	Tándem	1.537	4.3	36 % Cumple
16+000						
Por eje	Borde	20	Simple	1.457	4.3	34 % Cumple
Por eje + ΔT	Borde	20	Simple	2.152	4.3	50 % No cumple
17+000						
Por eje	Borde	20	Simple	1.504	4.3	35 % Cumple
Por eje + ΔT	Borde	20	Simple	2.131	4.3	50 % No cumple
18+000						
Por eje	Borde	20	Simple	1.589	4.3	37 % Cumple
Por eje + ΔT	Borde	20	Simple	2.261	4.3	53 % No cumple

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se identificó y estableció de manera satisfactoria los puntos de estudio, realizando en cada una de ellas las mediciones correspondientes y la toma de muestras para su respectiva caracterización en el laboratorio de la UAJMS.

También se obtuvo la información necesaria proveniente del diseño original para complementar con los datos obtenidos y efectuar el análisis planteado.

Para efectuar las simulaciones se utilizó el modelador tridimensional de elementos finitos EverFE 2.26 en su última versión.

Se determinaron los esfuerzos máximos y sus respectivas deflexiones en cada punto de estudio, bajo los escenarios de carga (simple, tándem, simple + ΔT y tándem + ΔT), aplicados en el borde y esquina de las losas en el respectivo carril de cada sección en análisis, bajo las condiciones reales en el que el pavimento se encuentra lateralmente soportado y en las condiciones de sin soporte lateral.

Como resultado de la comparación realizada de los estados (con soporte lateral y sin soporte lateral), en función a la respuesta estructural teórica (esfuerzos y deflexiones), generados en cada punto de estudio podemos concluir que efectivamente la presencia del soporte lateral aumenta la capacidad estructural del pavimento.

En cuanto al análisis estructural bajo el criterio de falla por fatiga realizado en cada sección de estudio obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 36. Resumen del análisis de control de diseño estructural por fatiga

Cargas	Posición de la carga	Tipo de eje	Modelo de fatiga Esfuerzo máximo < 50 % del MR									
			6 + 000		7 + 000		16 + 000		17 + 000		18 + 000	
			Sin berma	Con berma	Sin berma	Con berma	Sin berma	Con berma	Sin berma	Con berma	Sin berma	Con berma
Por eje	Borde	Simple	52.3 %	28.8 %	53.0 %	28.9 %	54.7 %	29.7 %	56.6 %	30.7 %	52.1 %	32.7 %
Por eje	Borde	Tándem	36.6 %	20.5 %	37.2 %	20.7 %	38.3 %	21.3 %	39.5 %	21.9 %	36.3 %	22.5 %
Por eje	Esquina	Simple	33.1 %	20.1 %	34.7 %	20.2 %	34.7 %	20.5 %	34.6 %	20.9 %	33.7 %	15.3 %
Por eje	Esquina	Tándem	37.1 %	17.4 %	38.4 %	17.4 %	39.3 %	17.8 %	40.2 %	18.1 %	35.5 %	17.9 %
Por eje + ΔT	Borde	Simple	66.6 %	44.1 %	66.1 %	43.6 %	66.5 %	43.0 %	67.0 %	42.5 %	65.1 %	45.7 %
Por eje + ΔT	Borde	Tándem	43.9 %	29.3 %	44.3 %	29.3 %	44.5 %	29.0 %	44.9 %	28.8 %	43.4 %	29.8 %
Por eje + ΔT	Esquina	Simple	32.7 %	30.8 %	32.3 %	28.7 %	32.4 %	28.2 %	32.6 %	27.9 %	31.9 %	17.0 %
Por eje + ΔT	Esquina	Tándem	42.3 %	31.1 %	42.3 %	30.5 %	42.1 %	29.6 %	41.8 %	28.8 %	41.5 %	30.0 %

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados reflejados en la tabla 36 se llegó a la conclusión de que en todos los puntos de estudio y bajo los mismos escenarios, con la carga en el borde por (eje simple y eje simple + ΔT), sin considerar el soporte lateral la estructura de pavimento presentaría fallas por fisuramiento, poniendo en evidencia de que el tipo de carga más desfavorable es el Eje Simple. También podemos concluir que en cada uno de los escenarios planteados donde si es considerado el soporte lateral que existe en los puntos de estudio, la estructura es capaz de resistir un número infinito de repeticiones de cargas, garantizando que el pavimento no presentara fallas por fatiga.

Los resultados provenientes de la optimización del espesor de las losas en cada sección de estudio en el tramo, nos muestran que el soporte lateral que existe en los mismos nos permite optimizar al pavimento reduciendo el espesor de las losas a 21cm, siendo este el espesor límite capaz de resistir de manera satisfactoria cumpliendo con el criterio de falla por fatiga, ante las cargas impuestas.

Finalmente se concluye que el método de elementos finitos por medio del modelador tridimensional EverFE 2.26, ha demostrado ser muy eficaz y en el caso particular, permitió analizar las losas con acero de refuerzo de la carretera Campo Pajoso – Caraparí, por lo tanto, marca un camino por seguir para estudiar la sensibilidad de distintos factores que pueden afectar al diseño de pavimentos rígidos.

5.2 RECOMENDACIONES

Tomar en cuenta los efectos de reducción de esfuerzos, deflexiones aportados por la utilización de soporte lateral a las losas de pavimento rígido, con la intención de que el diseño sea más eficiente.

Evaluar desde una perspectiva económica el beneficio de la utilización de soporte lateral, ponderando los costos de materiales y construcción que implica su utilización, así como los aspectos del diseño que pueden hacerse más eficientes.

Considerar desde el punto de vista constructivo el empleo de sonorizadores en los soportes laterales, ya que su función principal es la de redireccionar al conductor si es que por algún motivo se sale del carril.

En los pavimentos diseñados con soporte lateral, es muy importante la señalización horizontal para que el conductor circule correctamente sobre el carril contemplado en el diseño, por ello se recomienda tomar la debida importancia a la señalización horizontal.

En pavimentos rígidos cuyo diseño estructural implique la utilización de soporte lateral, procurar que el diseño geométrico de la carretera tome en cuenta a estos elementos para asegurar la existencia de espacio suficiente para su construcción.

Se recomienda también crear bases de datos que contengan parámetros de clima, tránsito y cargas propios de Bolivia, para utilizarlos en el diseño de pavimentos.

El presente estudio tiene un carácter analítico, por lo cual se recomienda ampliar la investigación en el tema, mediante la observación de la evolución a través del tiempo de las condiciones de los pavimentos en campo.