

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, instituciones internacionales dedicadas a la investigación de los pavimentos, han impulsado la innovación en pavimentos rígidos con losas de dimensiones superficiales distintas a las tradicionales.

Estos avances en pavimentos rígidos permitirían aumentar sustancialmente la vida útil de éstos; mediante la aplicación de un método, el cual consiste en cambiar el diseño de las losas de pavimento rígido tradicional por unas de dimensiones cortas, capaces de distribuir mejor la carga y evitar el agrietamiento temprano.

Las metodologías para el diseño de pavimentos rígidos, minimizando el tamaño de las losas dada las geometrías de los camiones. Se realizan considerando la forma en que el camión carga las losas. El diseño considera que sólo una rueda o tren de ruedas carga una losa a la vez. Esto reduce drásticamente las tensiones superiores producidas por este efecto. Además las losas cortas tienen un menor alabeo.

También cabe destacar que con el análisis de los pavimentos con losas cortas, se busca, la disminución potencial o definitiva de la retracción hidráulica que afecta considerablemente a los pavimentos rígidos, ya que esta retracción agrieta los pavimentos en horas, semanas o meses y es producida por factores como: geometría de las piezas, condiciones atmosféricas, temperatura y humedad.

Los estudios realizados sobre el comportamiento de las losas están en función a las características del pavimento rígido; la resistencia, el agrietamiento de la losa que dependerá de la carga, de las dimensiones de la losa, de las condiciones ambientales.

Lo que se pretende al realizar este trabajo es analizar el desempeño, verificar la resistencia bajo cargas, mediante un análisis del comportamiento de los pavimentos rígidos con losas cortas de hormigón, a partir de prácticas no destructivas, las cuales se basan en la determinación de la capacidad estructural del pavimento mediante un análisis de los esfuerzos y deformaciones que se producen en las losas de pavimento.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La necesidad de obtener obras viales de mayor calidad, durabilidad, seguridad, y de buenas características, cada día es más trascendente, debido principalmente a la mayor exigencia y al considerable aumento de tráfico en nuestro medio.

El pavimento rígido, representa una alternativa sumamente favorable en la construcción de vías en general, si se compara con sus similares de asfalto, debido a la cantidad de ventajas que ofrece en comparación con este siendo las más notables: su durabilidad, su bajo costo de mantenimiento.

Dado el elevado costo en la construcción del pavimento rígido, surge inmediatamente la necesidad de realizar una investigación que nos brinde información sobre el desempeño de los pavimentos rígidos, para verificar su resistencia bajo cargas de tráfico y condiciones ambientales.

Se sabe que el largo y ancho de las losas tiene un importante efecto en las tensiones en el hormigón, que es la causa del agrietamiento producido por fatiga. También tiene un efecto la posición de las ruedas sobre las losas.

Por ello se hace necesario realizar una investigación que nos brinde información sobre el desempeño de los pavimentos rígidos con losas cortas; este sistema consiste en rediseñar las dimensiones de las losas tradicionales, con losas cortas de menor superficie. Debido a este redimensionamiento se conseguiría disminuir los espesores de las capas de pavimento rígido para las carpetas de rodadura, además, se dejaría a un lado la utilización de acero de refuerzo, lo que reduciría los precios en la construcción de pavimentos rígidos.

Dado lo anterior, se hace necesario realizar una investigación que nos brinde una metodología tecnificada y que tenga como base los estándares utilizados en la actualidad para el diseño de este tipo de pavimento, además de crear los instrumentos necesarios que pueda dar una evaluación del desempeño de estos pavimentos, lo más real posible.

Estos avances se hacen necesarios darlos a conocer, además de su posible implementación en nuestro país, con el objetivo de tener una nueva alternativa de diseño de pavimentos, también para una posible aplicación en la rehabilitación y evaluación de pavimentos, de esta manera proporcionar un beneficio al país.

Al analizar el desempeño de pavimentos rígidos con losas cortas, se contribuirá con un aporte teórico para personas que se desenvuelven en el área de diseño y construcción de carreteras de pavimentos rígidos, en lo fundamental y básico que respecta a esta área de la ingeniería.

A fin de lograr un completo análisis de las deformaciones y los esfuerzos a los que están sometidos los pavimentos, se considera realizar un estudio de comparación de todos los resultados obtenidos por las diferentes metodologías desarrolladas en este trabajo de investigación.

### **1.3 DISEÑO TEÓRICO**

#### **1.3.1 Determinación del Problema**

##### **1.3.1.1 Situación del problema**

Los pavimentos son estructuras diseñadas para ofrecer seguridad, confort, rapidez y economía para los vehículos que transitan sobre él. Con el paso del tiempo el efecto repetitivo de las cargas del tránsito, la acción climática, las deficiencias constructivas, o de los materiales utilizados, inducen un deterioro sobre su estructura. En función de su grado de deterioro se diseñan las reparaciones o rehabilitaciones pertinentes para prolongar su vida útil.

En el campo vial sobre todo en la construcción de pavimentos siempre se tiene la interrogante al momento de tomar una decisión sobre si se debe efectuar un pavimento flexible o un pavimentos rígido, para tomar la mejor elección se consideran los aspectos de costo inversión, costo mantenimiento, durabilidad y confort, en el aspecto de durabilidad se espera que los pavimentos dentro de su vida útil no sufran deterioros a temprana edad y tampoco con demasiada severidad, por ello si se trata de pavimentos rígidos se debe buscar los elementos que nos den la seguridad de contar con pavimentos

que tengan una mayor durabilidad y menor deterioro a través del tiempo, una de las variables que incide mucho en su durabilidad en estas condiciones es la dimensión de la losa es decir, el ancho, largo y espesor de la losa, sobre estos elementos es que se debe hacerse un análisis más detallado de manera que se consiga superficies de losas apropiadas para lograr garantizar una mayor durabilidad.

Es por ello que basándonos en investigaciones realizadas en otros países, planteamos buscar metodologías para analizar el desempeño de pavimentos rígidos con losas cortas, que nos permitan aumentar la resistencia y durabilidad de los pavimentos con el paso del tiempo en condiciones óptimas.

La optimización realizada por esta metodología permitiría reducir las dimensiones de una losa de pavimento rígido tradicional para una misma vida útil, generando ahorros importantes en el costo inicial de los pavimentos.

Los estudios realizados se basan considerando las condiciones particulares de cada país; ya sea clima, tráfico, capas, y materiales, es por ello que se plantea la necesidad de desarrollar metodologías, donde se realicen modelos de deterioro para las condiciones presentadas en nuestro país, para los pavimentos rígidos y así tener confiabilidad de utilizarlos para el diseño.

Además que nuestro país posee poca información documentada, respecto al diseño de losas de dimensiones cortas, en pavimentos rígidos por lo tanto se pretende fortalecer el conocimiento de esta tecnología.

### **1.3.1.2 Problema**

¿Será viable realizar un análisis del desempeño estructural de los pavimentos rígidos con losas cortas?

## **1.3.2 Objetivos**

### **1.3.2.1 Objetivo general**

Realizar un análisis comparativo del desempeño estructural de los pavimentos rígidos tradicionales y los pavimentos con losas cortas de hormigón, a partir de la obtención de las deflexiones, ante la acción dinámica del tránsito y del medio ambiente, recreando de la forma más real posible el estado de los esfuerzos y de las deformaciones a las que se ve sometido la estructura del pavimento por diversas metodologías.

### **1.3.2.2 Objetivos específicos**

- Brindar una base teórica, sobre el método de diseño de losas cortas de pavimento rígido; mediante la recopilación de información existente sobre este método de diseño.
- Realizar un análisis de los esfuerzos a los que están sometidas las losas de pavimento rígido, clasificando cada tipo de esfuerzo y posteriormente registrarlo en tablas.
- Poner en práctica un método de diseño de losas cortas de pavimento rígido, con la determinación de cada uno de sus componentes y esfuerzos a los que son sometidos.
- Determinar la eficiencia y características de beneficio estructural, que otorga el método constructivo de losas cortas, a través de la obtención de los valores de esfuerzos a los que son sometidos las losas cortas de pavimento.
- Determinar las deflexiones que se producen en el pavimento: mediante la simulación de la aplicación de cargas cíclicas generadas por el paso constante de vehículos, conjuntamente con los valores obtenidos mediante el equipo conocido como Viga Benkelman y con los esfuerzos determinados a flexión del hormigón obtenidos de la realización de vigas modelo que serán sometidos a cargas puntuales.

- Evaluar estructuralmente la construcción de pavimentos rígidos con losas cortas, realizando una comparación con respecto a los pavimentos rígidos de dimensiones tradicionales.
- Con resultados obtenidos elaborar conclusiones y recomendaciones sobre el diseño de losas cortas de pavimento rígido, mediante un análisis, de todos los valores que sean obtenidos de las simulaciones y de los ensayos en el diseño de pavimentos por las diferentes metodologías desarrolladas.

### **1.3.3 Hipótesis**

La hipótesis que se plantea es que al experimentar la variación en el diseño de las losas de pavimento rígido tradicional, por unas de dimensiones cortas, estas serían capaces de distribuir mejor la carga y evitarían el agrietamiento temprano, como consecuencia esto influiría en el desempeño estructural, presentando una opción competitiva en la construcción.

### **1.3.4 Definición de variables independientes y dependientes**

#### **1.3.4.1 Variable independiente**

Se toma como variables independientes a las deflexiones y a los esfuerzos determinados, a partir de la realización de las simulaciones de cargas de tránsito y de la aplicación de los ensayos de laboratorio respectivamente, para conocer las características y el comportamiento del sistema estructural del pavimento.

#### **1.3.4.2 Variable dependiente**

Se toma como variable dependiente al desempeño de las losas de pavimento rígido, obtenido mediante el análisis de los datos adquiridos por las diferentes metodologías aplicadas.

#### **1.3.4.3 Unidad de observación**

La unidad de observación será el comportamiento de las losas de pavimento rígido frente a la variación de la superficie de las losas.

## **1.4 DISEÑO METODOLÓGICO**

### **1.4.1 Unidad de estudio y decisión muestral**

#### **1.4.1.1 Unidad de estudio**

La unidad de estudio en este trabajo de investigación: es el comportamiento de las losas de pavimento rígido, a través de la obtención de los esfuerzos y de las deflexiones producidas en los pavimentos; mediante la aplicación de diferentes metodologías, variando la superficie de las losas tradicionales.

#### **1.4.1.2 Población**

Para el presente trabajo de investigación, el universo de los datos que generan la población serán: el conjunto de losas de pavimento rígido en el departamento de Tarija y todos los elementos que lo componen.

#### **1.4.1.3 Muestra**

La muestra son las diferentes combinaciones de las dimensiones de losas de pavimento rígido: losas tradicionales y losas cortas, para la determinación de esfuerzos y deformaciones en el diseño de los pavimentos; para ello se tomara una parte del universo de la población de pavimentos rígidos en el departamento de Tarija, como ser las zonas de Villamontes, Yacuiba y Entre Ríos.

#### **1.4.1.4 Muestreo**

El criterio de muestreo que se adoptara en este trabajo de investigación, será en primer lugar la selección de las de las zonas de estudio; en nuestro caso los pavimentos rígidos que actualmente se encuentran en funcionamiento en las zonas de Villamontes, Yacuiba y Entre Ríos, con los datos recolectados de estos pavimentos se efectuaran los ensayos, para analizar el comportamiento de estos pavimentos y luego compararlos con los valores de las simulaciones de los pavimentos rígidos con losas cortas, variando la superficie de los pavimentos rígidos de dimensiones tradicionales por dimensiones menores.

Dentro del muestreo cualquiera de las muestras aleatorias, de las diferentes variaciones en las dimensiones de las losas, puede satisfacer las funciones de desempeño favorablemente o puede no llegar a satisfacer las condiciones estructurales.

#### **1.4.2 Métodos**

Para elaboración del presente trabajo de investigación se adoptó el método aplicativo y el método experimental.

**1.4.2.1 Aplicativo:** El presente trabajo parte de una lógica, que se basa en la determinación de los esfuerzos en la estructura de un pavimento, a partir de la realización de simulaciones de cargas de tráfico generadas por el paso de los vehículos y condiciones ambientales características para cada zona de estudio; a través del uso de un software computacional aplicado a modelos de losas de pavimento rígido, esta práctica se realizara variando las superficie de las losas tradicionales, por dimensiones menores definidas como losas cortas de pavimento.

**1.4.2.2 Experimental:** Es experimental, porque se realizarán observaciones y mediciones directamente sobre la superficie del pavimento, mediante el equipo llamado viga Benkelman, el cual nos sirve para determinar las deflexiones que se producen en la estructura de un pavimento.

También se realizarán prácticas experimentales de laboratorio, para determinar los esfuerzos a flexión del hormigón, obtenidos de la fabricación de vigas modelo, que serán sometidas a cargas puntuales, a través de la máquina que mide la carga que logren resistir estos moldes.

#### **1.4.3 Técnicas**

Las técnicas usadas en este trabajo de investigación serán las siguientes:

##### **1.4.3.1 Recolección de datos**

Previo a la realización de cualquier metodología se procederá a recolectar toda la información necesaria de los pavimentos seleccionados como zonas de estudio.

### **1.4.3.2 Simulaciones**

En primer lugar se procederá a la selección de un programa de elementos finitos, que describa adecuadamente la estructura de un pavimento, el programa debe tener en cuenta las discontinuidades en las estructuras de pavimento, debe ser capaz de analizar múltiples carga de ruedas, así también analizar las cargas del medio ambiente.

Posteriormente se realizará la configuración de las losas tradicionales y las losa cortas, se identificarán la forma y las dimensiones de cada losa en una tabla.

Con los datos de los pavimentos recolectados y luego de seleccionar el programa, se procederá a la realización de modelos de comportamiento, haciendo variar las dimensiones de las losas de pavimento rígido.

Con los valores obtenidos de las simulaciones, por medio del programa computacional, el cual nos proporcionará resultados de esfuerzos, finalmente realizaremos una evaluación estructural de las losas de pavimento rígido.

### **1.4.3.3 Ensayos**

En el presente trabajo de investigación, se realizara todos los ensayos correspondientes, para la elaboración de vigas modelo, que serán sometidas a cargas puntuales para determinar la resistencia a flexión del hormigón.

- Granulometría agregado grueso y fino
- Peso específico agregado grueso y fino
- Peso unitario agregado grueso y fino
- Finura del cemento
- Análisis de agua

### **1.4.3.4 Medida de deflexiones**

Se tomarán medidas de las deflexiones producidas en la superficie del pavimento a través de la práctica viga Benkelman. Los segmentos en estudio serán cada 5 m.

#### **1.4.3.5 Procesamiento de datos**

Los valores obtenidos por las diferentes técnicas serán analizados y procesados en el capítulo 3 del presente trabajo.

#### **1.4.3.6 Tabulación**

Se realizara una recopilación de los valores obtenidos por las diferentes metodologías y se los ordenara en tablas resumen de resultados.

#### **1.4.3.7 Comparación**

Se efectuará una comparación entre los datos obtenidos por las respectivas metodologías lo cual permitan establecer un análisis de deformación del pavimento.

#### **1.4.4 Plan de trabajo**

En forma resumida las metodologías que se desarrollarán tendrá los siguientes pasos:

- Simulación de modelos estructurales y obtención de esfuerzos en losas de configuración corta y en losa tradicionales.
- Realización de vigas modelo que cumplan con las especificaciones para un buen desempeño y para finalmente obtener los valores de los esfuerzos a flexión de estos hormigones.
- Medidas de las deflexiones producidas en la superficie del pavimento a través de la práctica viga Benkelman.

### **1.5 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

El alcance del presente trabajo, se traduce netamente a un análisis de investigación, que va enfocado a elaborar un método de diseño de losas cortas, en pavimentos rígidos, dando a conocer, que si al minimizar las dimensiones de los pavimentos, se garantiza un buen desempeño estructural, que implica soportar las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales.

Previamente a establecer el procedimiento para la realización de este método, se hará una recopilación de la información existente de este método de diseño, para dejar establecido una base teórica necesaria para la comprensión de este método.

Posteriormente se establecerá un procedimiento, donde se cumpla con las especificaciones técnicas establecidas; y poder realizar un análisis estructural de estos pavimentos con resultados que se asemejen lo más posible al comportamiento real que tienen estos pavimentos.

Existe en nuestro país poca o nula información documentada, sobre este método de diseño, que complica la realización de los modelos de comportamiento de las losas, requeridos para poder ser desarrolladas y evaluadas, por lo que se tratará de adaptar lo más que se pueda estos datos a las condiciones que tenemos en nuestro medio.

Todos los datos y resultados obtenidos con las simulaciones de prueba son sometidos a un proceso de análisis para su valoración, lo cual se verá reflejado en la elaboración de tablas, gráficos; y con estas herramientas interpretar el comportamiento estructural de las losas cortas de pavimento rígido.

## **1.6 LIMITACIONES**

- El desarrollo de la investigación estará enfocado únicamente a la elaboración del diseño del pavimento con losas cortas; excluyendo el proceso constructivo.
- Para la elaboración de esta investigación se tomara en cuenta los valores estructurales de tres pavimentos rígidos, que ya se encuentran en funcionamiento, que servirán como guía para realizar el diseño de los modelos de losas cortas en un programa computacional, reduciendo la superficie de las losas de pavimento rígido tradicional, por losas de dimensiones menores obteniéndose del programa los valores de esfuerzos y deformaciones impuestas por las cargas de tráfico y condiciones ambientales
- La información teórica y el análisis que se realizará, estarán basadas en estudios similares y experiencias en el tema de países en los que ya se tiene un buen terreno ganado en esta área; lo que deja de lado la comprobación de dichos señalamientos, debido a que ésta es producto de un levantamiento de campo, la cual está fuera de los alcances de este trabajo de investigación.

## **2.1 GENERALIDADES SOBRE PAVIMENTOS RÍGIDOS**

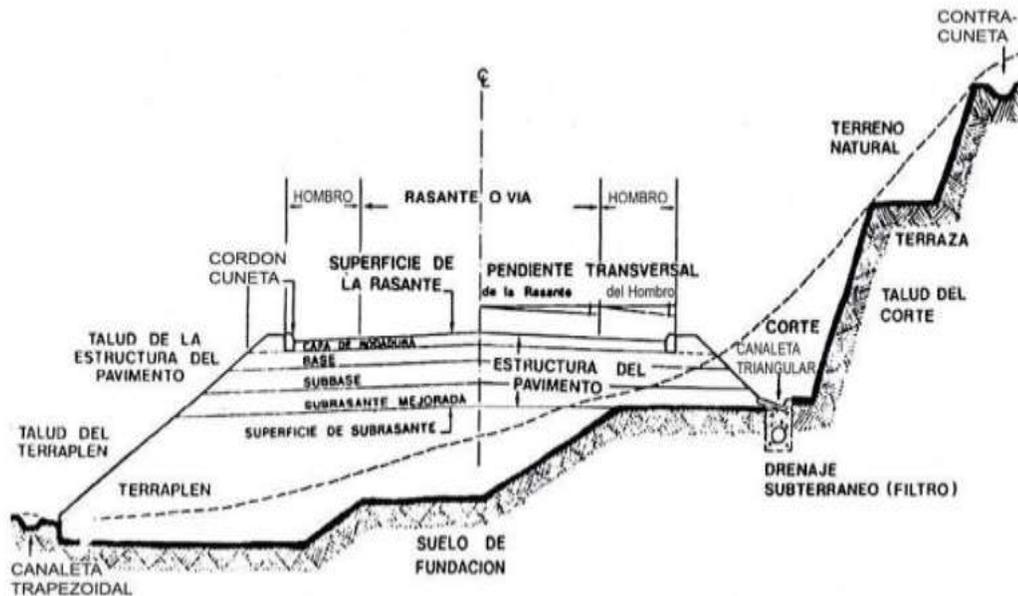
### **2.1.1 Definición de pavimento**

Pavimento es el conjunto de capas de material seleccionado colocado horizontalmente que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas.

Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas. Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías, además de que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza, y por consecuencia resultan los más económicos. La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa, el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior.

La resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material que la constituye, también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo; siendo dos factores importantes la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.

Esquema 2.1 Sección transversal de una vía



Fuente: Ingeniería de carreteras volumen I, Víctor Sánchez Blanco

### 2.1.2 Tipos de pavimentos

Hoy en día los pavimentos pueden clasificarse de dos formas:

- a) De acuerdo al material que compone su capa de rodadura.
- b) Según la forma en que la estructura de éstos atiende y transmite las cargas aplicadas sobre su superficie.

Según el material que compone su capa de rodadura los pavimentos pueden ser:

- Pavimentos de tierra
- Pavimentos de piedra
- Pavimentos de adoquines
- Pavimentos de concreto hidráulico
- Pavimentos de concreto asfáltico

Imagen 2.1 Pavimento de tierra



Imagen 2.2 Pavimento de piedra



Imagen 2.3 Pavimento de adoquín



Imagen 2.4 Pavimento de concreto asfáltico



Imagen 2.5 Pavimento de concreto hidráulico



Fuente: Elaboración propia

Según la forma en que la estructura del pavimento transmite las cargas aplicadas sobre él, éstos se dividen en:

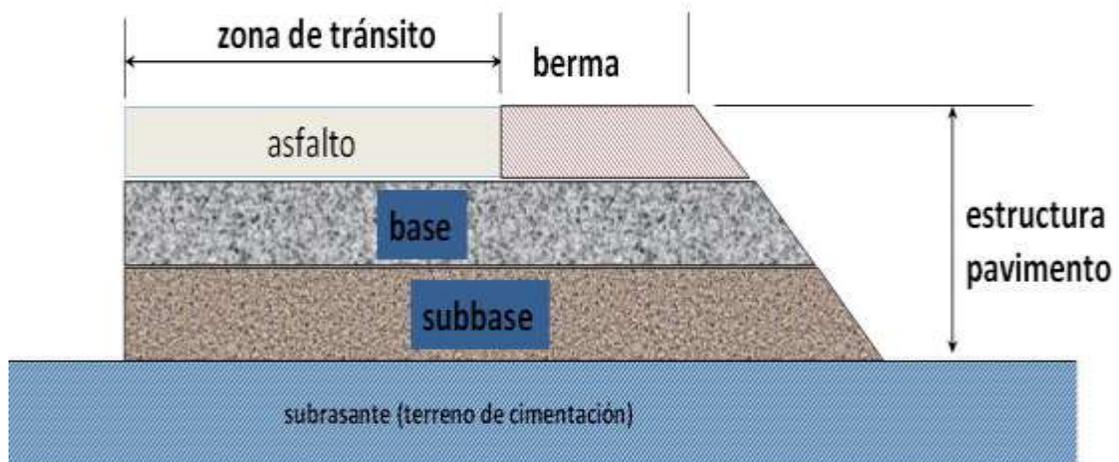
- Pavimentos flexibles
- Pavimentos rígidos

### 2.1.2.1 Pavimentos flexibles

Son aquéllos que tienen una carpeta de rodadura conformada por concreto de cemento asfáltico. Recibe el nombre de pavimento flexible debido a la forma en que se transmiten las cargas desde la carpeta de rodadura hasta la subrasante.

El asfalto no absorbe la totalidad de las cargas vehiculares, actúa más como un transmisor. Por ello, los pavimentos flexibles requieren, por lo general, de un mayor número de capas intermedias entre la carpeta de rodadura y la subrasante.

Esquema 2.2 Pavimento flexible



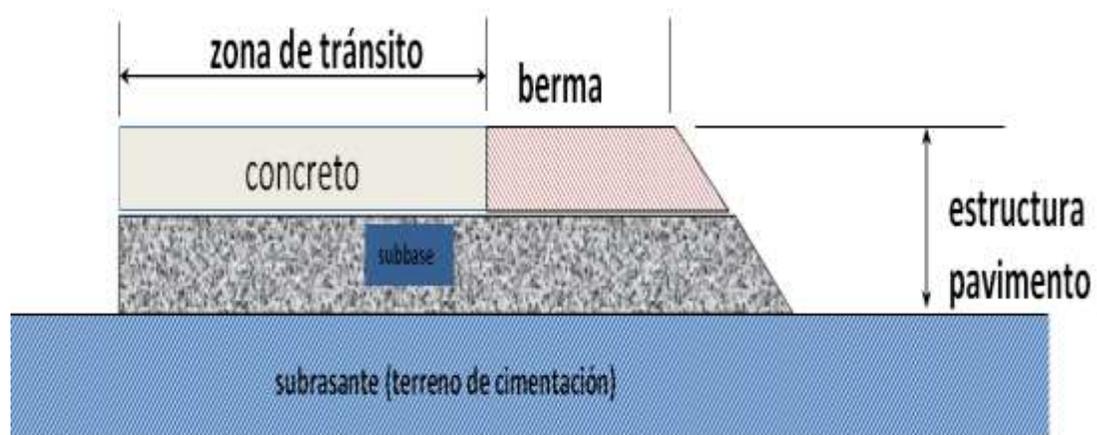
Fuente: Tópicos de pavimentos de concreto, Ing. Mario Becerra Salas

### 2.1.2.2 Pavimentos rígidos

Son aquéllos que tienen una carpeta de rodadura conformada por concreto de cemento hidráulico. Recibe el nombre de pavimento rígido debido a las propiedades de la carpeta de concreto, que absorbe en mayor grado las cargas vehiculares.

Debido a la naturaleza rígida de la carpeta de rodadura, las cargas vehiculares se distribuyen en una forma más eficiente. Por ello, por lo general, requieren en su estructura de un menor número de capas granulares entre la carpeta de rodadura y la subrasante.

Gráfica 2.3 Pavimento de concreto



Fuente: Tópicos de pavimentos de concreto, Ing. Mario Becerra Salas

La capa de rodadura de estos pavimentos la integran una serie de losas que trabajan en conjunto, distribuyendo las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores. Aunque algunas irregularidades menores en las capas de cimentación no se reflejen en la superficie, estas no son deseables, ya que pueden inducir una falla en el pavimento al ser la causa de cuarteaduras, fracturas, u otros defectos similares.

### **2.1.3 Elementos que conforman la estructura de un pavimento rígido**

#### **2.1.3.1 Subrasante**

Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño. El espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, por consiguiente, el diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la subrasante.

#### **2.1.3.2 Sub base**

Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la sub base. Esta debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.

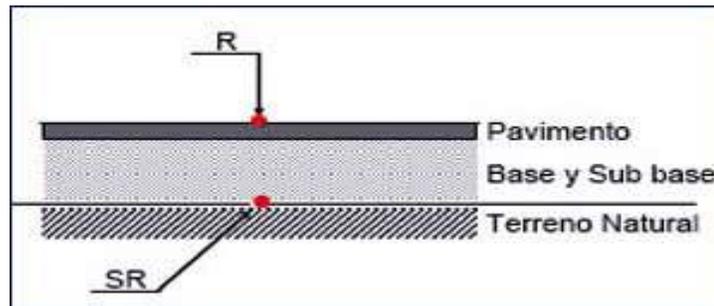
Se utiliza además como capa de drenaje y contralor de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares.

#### **2.1.3.3 Superficie de rodadura**

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.<sup>1</sup>

Esquema 2.4 Representación de un pavimento rígido



Fuente: Ingeniería de carreteras volumen I, Víctor Sánchez Blanco

Constituye la parte fundamental del pavimento rígido, debido a la rigidez que presenta la losa, esta clase de pavimentos no requieren, al menos desde un punto de vista teórico apoyarse sobre una explanada o capa elevada capacidad de soporte. Las losas deben estar capacitadas para resistir los esfuerzos producidos por el tránsito y los efectos de la intemperie, y proporcionar además una superficie de rodamiento segura, cómoda y de características permanentes bajo el efecto combinado del tránsito y de los efectos ambientales durante su vida útil, de manera que solo deban ser necesarias algunas actuaciones locales y esporádicas de conservación, de poca importancia y costo.

## 2.1.4 Tipología de pavimentos rígidos

### 2.1.4.1 Pavimento de concreto hidráulico simple (JPCP)

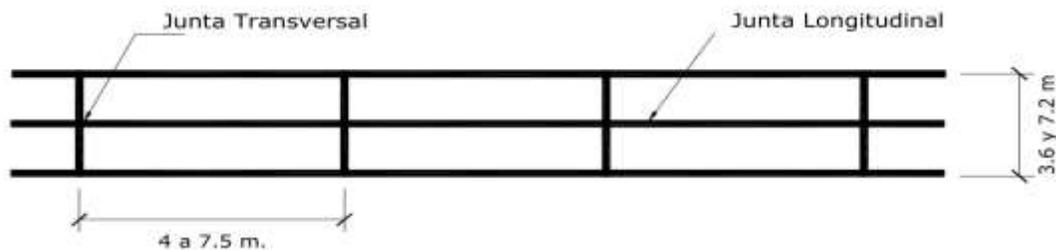
En este pavimento el concreto asume y resiste las tensiones producidas por el tránsito y las variaciones de temperatura y humedad. Este pavimento puede llegar a contener elementos de transferencia de carga, o bien no contenerlos, cada uno con su área aplicación.

<sup>1</sup> Diseño y conservación de pavimentos rígidos, Universidad Nacional Autónoma de México

### 2.1.4.2 Sin elementos de transferencia de carga o simples

Estos pavimentos han sido de aplicación común en el país tanto para tráfico ligero, como para tráfico pesado (altas solicitaciones), clima templado sugiriendo para condiciones severas de tráfico y un cimiento granular y/o tratado, para aumentar la capacidad soporte y mejorar la transmisión de carga.

Esquema 2.5 Juntas sin elementos de transferencia de carga

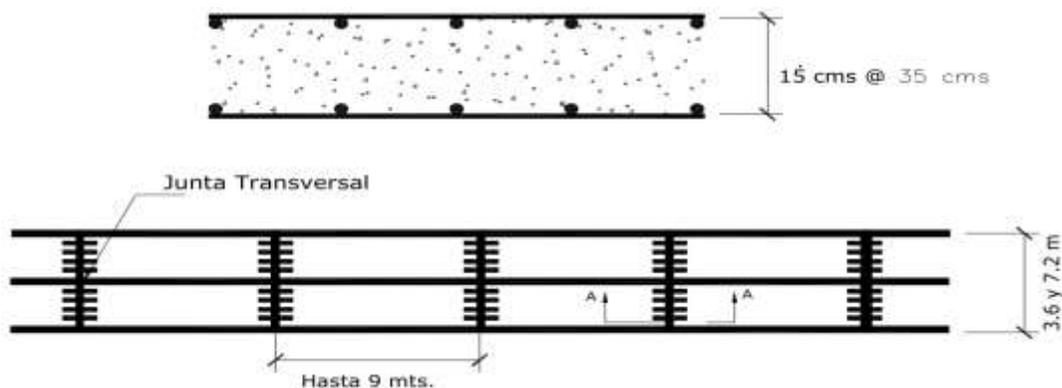


Fuente: Boletín técnico, publicado por la ASOCEM

### 2.1.4.3 Con elementos de transferencia de carga o dovelas

Pequeñas barras de acero, que se colocan en la sección transversal, en las juntas de contracción. Su función estructural es transmitir las cargas de una losa a la losa contigua, mejorando las condiciones de deformación en las juntas, evitando los desplazamientos verticales diferenciales (escalonamiento).

Esquema 2.6 Juntas con elementos de transferencia de carga o dovelas

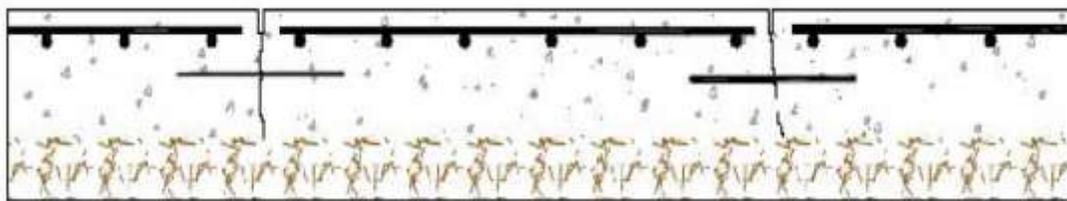


Fuente: Boletín técnico, publicado por la ASOCEM

#### 2.1.4.4 Pavimento de concreto hidráulico con refuerzo discontinuo distribuido sin función estructural (JRCP)

Tienen espaciamientos mayores entre juntas (entre 6.10 y 36.60 metros) y llevan armadura distribuida en la losa a efecto de controlar y mantener cerradas las fisuras de contracción.

Esquema 2.7 Sección longitudinal de un JRCP

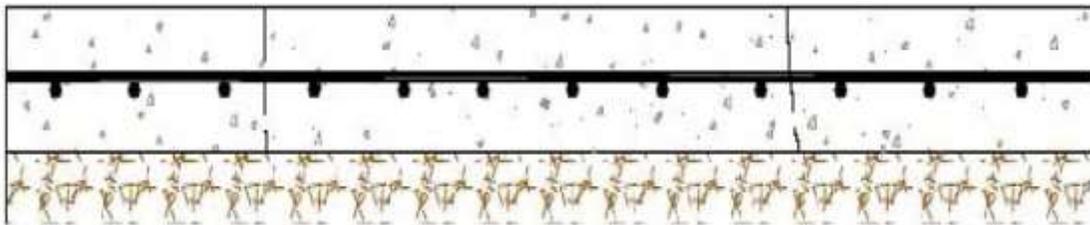


Fuente: Boletín técnico, publicado por la ASOCEM

#### 2.1.4.5 Pavimento de concreto hidráulico reforzado continuo sin función estructural (CRCP)

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 éstas permanezcan cerradas.

Esquema 2.8 Sección longitudinal de un CRCP

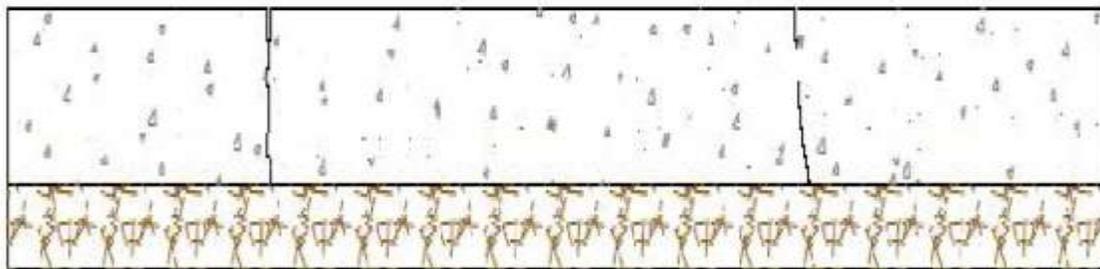


Fuente: Boletín técnico, publicado por la ASOCEM

#### 2.1.4.6 Pavimentos de concreto hidráulico compactado con rodillo (CCR)

Consiste en emplear mezclas con un contenido de cemento similar al del concreto convencional vibrado ( $250 - 400 \text{ kg/m}^3$ ), con un tamaño máximo del agregado grueso no superior a 19 mm, pero con una relación agua/cemento muy reducida que lo hace muy seco, sin revenimiento, que hace que no sea posible colocarlo en obra mediante vibración interna y tenga que efectuarse su compactación con rodillo vibratorio. No requiere formaletas, no requiere dovelas o refuerzo y no ocupa acabado o texturizado. Se utiliza en calles urbanas, vías principales y secundarias, aeropuertos, puertos, áreas de estacionamiento y patios de maniobras.

Esquema 2.9 Sección longitudinal de un CCR



Fuente: Boletín técnico, publicado por la ASOCEM

## 2.2 DISEÑO DE JUNTAS EN PAVIMENTO RÍGIDO

Las juntas deben estar diseñadas para transferir una porción de la carga entre losas adyacentes minimizando así deflexiones verticales en la junta producidas por las cargas de vehículos. El reducir deflexiones disminuye el potencial bombeo de materiales de capa sub base además del escalonamiento. Para que se obtenga una transferencia de carga satisfactoria se puede recurrir a uno de los siguientes mecanismos:

- Trabazón mecánica de los dispositivos de transferencia o barras pasa-juntas de acero liso.
- Bases estabilizadas rígidas, que reduzcan el nivel de deflexión.

**Trabazón de 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.

**Barras pasa-juntas.-** 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.

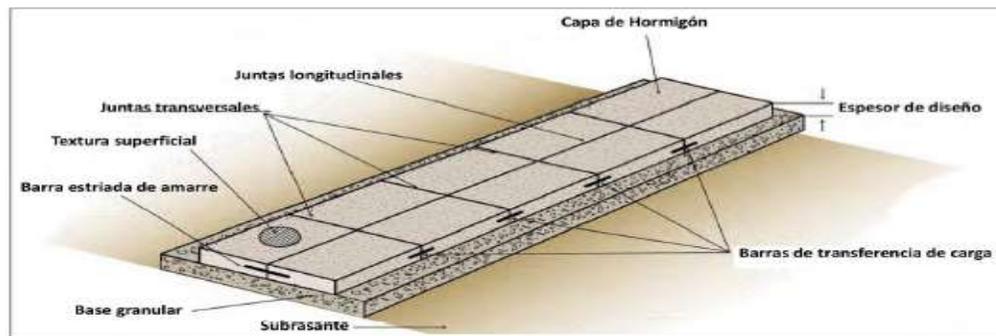
**Bases estabilizadas.-** Han sido también usadas para aumentar la transferencia de carga.

### **2.2.1 Espaciamiento y tipo de juntas**

El diseño de las juntas, que deben realizarse en el concreto, forma parte integrante del sistema estructural de los pavimentos de concreto, ya que sus características (espaciamiento, tipo, dimensiones, barras, sellos, etc.) Son un factor importante a considerar con relación a los esfuerzos de la losa y la durabilidad del pavimento y por lo tanto condicionan importantemente su diseño y comportamiento en servicio. Se distinguen los siguientes tipos de juntas:

- Juntas longitudinales
- Juntas transversales de dilatación.
- Juntas transversales de contracción
- Juntas transversales de construcción

Esquema 2.10 Elementos principales que componen un pavimento



Fuente: Pablo Emilio Sánchez Campos

En la Figura 2.15 se presentan los elementos principales que componen un pavimento de concreto, de manera de identificar en ella los tipos de juntas y barras.

### 2.2.2 Juntas transversales de construcción

Para los constructores estas son las juntas principales, porque no es fácil definir dónde se parara la obra. Si la junta transversal de construcción se va a realizar en el tercio medio, de una losa de un carril adyacente es necesario que la junta de construcción este dotada de hierros para cocerla evitando con ellos los movimientos relativos y eliminando la posibilidad de que se desarrolle una fisura en la losa adyacente.

El método más común para finalizar las labores de construcción es rematando la obra contra una formaleta de madera que genera una cara lisa, por lo cual es necesario dotar esta junta de pasadores de carga, así en el resto del pavimento la transferencia de cargas se está haciendo a través de la trabazón de agregados, y por ende la formaleta tiene que estar dotada de agujeros que permitan insertar las dovelas.

La formaleta se deja en su sitio hasta el momento de reiniciar las obras cuando se remueve. También se puede hacer una junta de construcción cortando el concreto, en cuyo caso se extiende el concreto pasando por el sitio en que debe quedar la junta, y luego con la ayuda de sierras se corta y se remueve el concreto que esté más allá del sitio de la junta de construcción.

Para alcanzar un buen resultado con el corte del concreto es necesario que las últimas tandas de concreto desarrollen más rápido la resistencia inicial. Al igual que con las juntas de construcción formaleteadas, es necesario poner dovelas, por lo que en este caso se necesita perforar agujeros para instalarlas.

Las juntas transversales de construcción no necesitan el corte inicial para debilitar la sección, solo es necesario hacer el corte secundario para conformar la caja en la que se aloja el material de sello.

### **2.2.3 Juntas transversales de expansión**

#### **2.2.3.1 Juntas con dovelas**

En las juntas transversales de expansión a uno de los extremos de las dovelas se les monta una cápsula de 50 mm de longitud, que permita absorber los movimientos de expansión de las losas, dicha cápsula se debe dotar con sistema que impida que se caiga, o se salga de la dovela durante la colocación.

Las condiciones que se le piden a las dovelas en las juntas de expansión, en cuanto al alineamiento y a la lubricación, son las mismas que las pedidas en las juntas transversales de contracción.

Dado que las juntas de expansión son más anchas que las de contracción a la canastilla en la que se van a fijar las dovelas de estas juntas, se le dota de un material de sello preformado y compresible con una altura idéntica a la losa de concreto.

#### **2.2.3.2 Junta sin dovelas**

La característica de las juntas de expansión sin dovelas en el diseño del pavimento por métodos tradicionales es que el espesor de la losa se incrementa para reducir los esfuerzos de borde. El incremento del espesor es del orden de un 20% y la transición se desarrolla suavemente en una longitud de 6 a 10 veces el espesor de la losa.

#### **2.2.4 Junta transversal de contracción**

Son las juntas que se generan al final del día o cuando se suspende la colocación del concreto. Estas juntas se deben localizar y construir en el lugar planeado siempre que sea necesario.

Si es posible se hará coincidir las juntas de construcción con una de contracción, si no, se hará en el tercio medio de la placa. Siempre se deben construir perpendicularmente al centro de la vía aun cuando las de contracción tengan esviaje.

#### **2.2.5 Junta longitudinal de contracción**

Las juntas longitudinales, cuando el pavimento se construye con un ancho de dos o más carriles, se cortan de manera similar a las juntas transversales de contracción, solo que el momento del corte no es tan crítico, pero se deben cortar rápidamente si la subbase es estabilizada, apenas se corten las juntas transversales. En cuanto a las barras de anclaje, los equipos de formaletas deslizantes tienen dispositivos para insertarlas.

Por el poco movimiento que tienen estas juntas no necesita de una caja para el sello, basta hacer un corte de 3 a 6 mm de ancho, con una profundidad igual a la tercera parte del espesor de la losa. Sin embargo, si se pide la caja para el sello, esta se puede hacer con un equipo multidisco que corta a la profundidad y anchos deseados. Con el fin de optimizar el costo de los selladores de las juntas, en las longitudinales se puede utilizar un sellador diferente como consecuencia de los menores movimientos de estas juntas.

#### **2.2.6 Junta longitudinal de construcción**

En estas juntas hay dos aspectos para tener en cuenta, la inserción de las barras de anclaje y el sellado de las juntas. Respecto a la inserción de las barras de anclaje esto se puede hacer introduciendo, en el concreto fresco, las barras dobladas en un ángulo de 90°, perforando agujeros en las losas y luego meter las barras en ellos y asegurarlas

con un mortero epóxico para que puedan cumplir con su función, que es anclar las losas.

Cuando se opta por insertar las barras dobladas en un ángulo de  $90^\circ$  se debe preferir el acero de 40,000 psi al de 60,000 psi ya que toleran mejor las deformaciones.

Las juntas longitudinales de construcción necesitan una caja para el sello, muy ancha para poder acomodar las variaciones longitudinales, en el borde de las losas, generadas por el proceso constructivo, pero el corte y el sellado son similares al de las juntas longitudinales de contracción.

## **2.3 COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS**

Los pavimentos deben ser diseñados, construidos y mantenidos con la finalidad de lograr un comportamiento funcional y estructural óptimo durante su ciclo de vida.

### **2.3.1 Factores que afectan el comportamiento del pavimento de concreto**

El pavimento de concreto es una estructura de gran superficie expuesta en relación a su volumen, y en tal sentido pasa gran parte del tiempo solicitado a la acción del medio ambiente a través de los gradientes térmicos (de ciclo diario) y de los gradientes de humedad (de ciclo estacional). Asimismo, a las solicitaciones propias del tránsito. Tales factores (clima y tránsito) tienen una acción preponderante y temporal sobre el comportamiento del pavimento.

Cabe resaltar que estos factores son simultáneamente causa y efecto de los deterioros en los pavimentos, es decir, que de algunos deterioros existentes pueden devenir nuevos deterioros.

#### **2.3.1.1 Tráfico**

Cuando los ejes cargados transitan sobre el pavimento pasando de una losa a otra producen dos grandes efectos: esfuerzos de flexión en la losa de concreto y deflexiones en juntas, grietas, esquinas y borde del pavimento.

### 2.3.1.2 El medio ambiente

El medio ambiente puede afectar el comportamiento del pavimento en varias formas. Los cambios de temperatura y humedad pueden tener cierto efecto sobre la resistencia, durabilidad y capacidad de carga del pavimento y de los suelos de la subrasante.

Asimismo, estos gradientes deforman las losas de pavimento produciéndole alabeos que modifican continuamente las condiciones de apoyo y de contorno. Con propiedad puede decirse que el pavimento de concreto es una estructura viva que se mueve al compás de la naturaleza.

**2.3.2 Comportamiento funcional.-** Son los aspectos que afectan la calidad de la carpeta de rodadura y por ello están relacionados con la comodidad y seguridad de los usuarios de la vía.

El comportamiento funcional de un pavimento de concreto está asociado a la capacidad funcional que tiene para brindar una superficie segura y cómoda al usuario. En este contexto la regularidad o rugosidad superficial es la característica predominante, entre otras características tenemos:

- Textura
- Adecuada fricción superficial
- Trazado de la carretera, incluyendo peralte y radio de curvatura
- Fisuras

La **regularidad o rugosidad superficial** es la característica más percibida por el usuario ya que afecta la calidad de la rodadura. Se relaciona con los efectos de las vibraciones, tales como niveles de deterioros, probabilidad de dañar a las mercancías transportadas, desgaste de los vehículos y consumo de energía. La comodidad depende principalmente del vehículo y del perfil longitudinal de la carretera.

La **textura** de un pavimento es un parámetro crítico en la comodidad y seguridad de los usuarios y necesario para la conservación de carreteras, este parámetro influye

directamente en la capacidad del pavimento para evacuar el agua de la interface rueda pavimento y de forma indirecta en el valor del coeficiente de rozamiento del pavimento, que tiene gran importancia para la adecuada adherencia entre la rueda y el pavimento.

La **fricción superficial** de un pavimento es la fuerza desarrollada en la interface rueda pavimento que resiste el deslizamiento cuando se aplican las fuerzas de frenado. La fricción o resistencia al deslizamiento también es un valor crítico en la seguridad, ya que cuando los pavimentos están mojados el agua actúa como lubricante y reduce el contacto entre la rueda y pavimento. Si la película de agua es gruesa y al vehículo circula a gran velocidad, las ruedas pierden contacto con el pavimento, creando el peligroso fenómeno de hidroplaneo.

El **trazado** de la carretera se relaciona con los cambios angulares vertical y horizontal del pavimento. Una curva de radio demasiado pequeño, para la velocidad del proyecto, puede requerir reducciones de velocidad y además causar accidentes, especialmente cuando se combina con peraltes elevados o incluso contraperaltes. Carreteras con pendientes longitudinales extremas son antieconómicas y peligrosas.

La aparición de fisuras es el primer aviso de una carretera con problemas. Es señal de tensiones, debidas a condiciones climáticas o de cargas de tráfico que han sobrepasado los límites de la resistencia del pavimento.

### **2.3.2.1 Evaluación funcional**

Se entiende por evaluación funcional la inspección superficial realizada en una vialidad con el objeto de determinar los deterioros que afectan al usuario, pero que no comprometen la capacidad estructural del pavimento.

Los diversos organismos internacionales que investigan los pavimentos han creado diversos índices que permiten evaluar en qué estado se encuentra, esto con la finalidad de recomendar una rehabilitación oportuna.

Entre los principales indicadores del estado superficial del pavimento tenemos:

- Índice de serviciabilidad presente (PSI).
- Índice de regularidad internacional (IRI).
- Índice de estado (IE)

Cada uno de estos indicadores establece rangos para evaluar el pavimento. Su finalidad principal es definir en qué estado se encuentra superficialmente el pavimento, pero también puede ser un indicador de la necesidad de realizar una evaluación estructural.

**2.3.3 Comportamiento estructural.-** Aspectos relacionados a la integridad como estructura del pavimento. Es la capacidad del pavimento para soportar la acción combinada del tránsito y el medioambiente.

Una adecuada construcción del pavimento es un parámetro que impacta enormemente en la durabilidad del mismo. Es decir, el pavimento comienza bien y a medida que las cargas de tránsito circulan a través de la carpeta se va deteriorando. El clima es un factor que también interviene en el deterioro de los pavimentos, y que recientemente ha sido incorporado en las metodologías de diseño.\*Tópicos de Pavimentos de Concreto, Ing. Mario Becerra Salas.

#### **2.3.4 Clasificación de fallas**

Las fallas típicas en los parámetros de concreto se clasifican en:

- **Fallas de regularidad y superficie.-** Se consideran como fallas de regularidad aquellas que corresponden a defectos de forma, originados generalmente por diversas causas durante la construcción y afectan principalmente a la textura.
- **Grietas.-** Son fallas que se extienden a la superficie de la losa de concreto y tienen mucha incidencia en el comportamiento del pavimento. Las grietas en general se relacionan con la integridad de la superficie de rodamiento y su evolución en el mediano plazo.
- **Deterioros en juntas y grietas.-** Son fallas que aparecen a nivel de juntas y grietas.

### **2.3.5 Cuantificación de fallas**

Las fallas visibles deben ser cuantificadas de acuerdo a los siguientes parámetros: tipo, severidad y extensión. El tipo se refiere a que si son fallas funcionales o estructurales, la severidad queda definida por la apariencia de la falla expresada en porcentaje, en unidades de longitud por una descripción comparativa, o por una combinación de ellas, puede ser alta, media o baja. La extensión se expresa en orden de magnitud o en porcentaje de la junta, del número de paños o de la longitud de la vía afectada.

#### **2.3.5.1 Fallas funcionales**

Son leves relativamente, cuando un pavimento ha perdido su función inicial o asignada de antemano, se acepta que tiene falla funcional; generalmente está localizada en la capa superficial del pavimento y causa cierta incomodidad en los pasajeros que transitan la vialidad.

Pueden detectarse por simple observación visual. Entre las principales fallas funcionales tenemos: escalonamiento que es la principal causa de la rugosidad, superficie pulida, baches pequeños, fisuramiento por retracción, desintegración, etc.

#### **2.3.5.2 Fallas estructurales**

Pueden originarse en una o varias capas del pavimento, son graves, consisten en el rompimiento del pavimento por la falla estructural de alguna o varias de sus capas o por la incapacidad del suelo que lo soporta. Estos deterioros cuando están muy avanzados, imposibilitan al pavimento para resistir las cargas que se le imponen en la superficie.

Aunque estas fallas pueden detectarse por observación visual, siempre es necesario auxiliarse con ensayos destructivos y/o no destructivos para cuantificar la magnitud de los daños para poder proponer soluciones técnicas racionales y económicas.

Entre las principales fallas estructurales tenemos: grietas (longitudinal, transversal, de esquina), punzonados, levantamientos, agrietamiento por durabilidad, etc. Muchas de estas fallas no son provocadas por la acción del tránsito sino por otras causas como son:

malas técnicas de construcción, agrietamiento por baja temperatura, etc. No obstante esto, la acción del tráfico acelera el proceso de deterioro.

## **2.4 MÉTODOS TRADICIONALES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS**

### **2.4.1 Método de diseño PCA**

El método de diseño de la Portland Cement Association, es exclusivamente un método de diseño desarrollado para pavimentos de concreto hidráulico. Los aspectos indicados en éste apartado se basan principalmente en lo indicado en el manual de diseño de la PCA (Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements) edición 1984.

En general, el método de diseño de la PCA está basado en:

- Análisis comprensivo de esfuerzos en el concreto y deflexiones en las juntas del pavimento, esquinas, y bordes, por un programa de computadora de elemento finito.
- Modelos y pruebas a escala verdadera como la Arlington Test y varios proyectos de investigación dirigidos por la PCA y otras agencias acerca de sub-bases, juntas y hombros de concreto.
- Pavimentos experimentales sujetos a pruebas de tráfico controlado, tales como la Bates Test Road, the Pittsburg Test Highway, the Maryland Road Test, the AASHO Road Test, y estudios de pavimentos de autopistas en servicio realizado por varios departamentos de estado de transporte.

#### **2.4.1.1 Criterios de diseño del método de la PCA**

El método de diseño de la PCA considera dos criterios de falla: el criterio de erosión de la sub-base por debajo de las losas y el criterio del esfuerzo de fatiga.

- El criterio de erosión de la sub-base por debajo de las losas, el cual reconoce que el pavimento puede fallar por un excesivo bombeo (erosión del terreno de soporte de la losa de concreto) y diferencias de elevaciones en las juntas.
- El criterio del esfuerzo de fatiga, el cual reconoce que el pavimento pueda fallar debido a excesivas repeticiones de carga.

#### **2.4.1.2 Factores de diseño del método de la PCA**

El diseño de espesores se realiza basándose principalmente en cinco factores:

- Resistencia a la flexión del concreto, (módulo de ruptura, MR).
- Soporte de la subrasante, o de la combinación de subbase y subrasante, (K).
- Periodo de diseño.
- Los pesos, frecuencias, y tipo de tráfico pesado que el pavimento soportará.
- Factor de seguridad para las cargas, (FS).

Los siguientes aspectos están basados principalmente en el manual de diseño de la PCA, “Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements”, entre otros.

#### **2.4.2 Método de diseño AASHTO**

##### **2.4.2.1 Principios del método AASTHO en pavimentos rígidos**

El procedimiento incluido en la Guía AASHTO determina el espesor **D** de un pavimento de hormigón para que éste pueda soportar el paso de un número W18 de ejes equivalentes de 18 kilolibras (8.2 toneladas) sin que se produzca una disminución en el índice superior a un cierto valor  $\Delta$  **PSI**. Dicho índice de servicio **PSI** es un valor que se calcula a partir de una serie de medidas en el pavimento (regularidad superficial, agrietamiento, baches), y que se ha comprobado que tiene una buena correspondencia con la calificación subjetiva que dan al mismo los usuarios.

La fórmula que relaciona las tres variables anteriores es la siguiente:

$$\log_{10} W_{18} = Z_R \times S_o + 7,35 \times \log_{10} (D + 1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4,5 - 1} \right]}{1 + \frac{1,624 \times 1}{(D + 1)^8}}$$

$$+ (4,22 - 0,32 p_t) \times \log_{10} \left[ \frac{S_c * C_d [D^{0,75} - 1,132]}{215,63 * J \left[ D^{0,75} - \frac{18,42}{(E_c / k)^{0,25}} \right]} \right]$$

**Ec 1.** En donde:

**W<sub>18</sub>**= Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 t, a lo largo del periodo de proyecto.

**Z<sub>R</sub>**= Fractil de la ley normal asociado al nivel de fiabilidad con el que se desea proyectar el pavimento.

**S<sub>o</sub>**= Desviación estándar que combina por una parte la desviación estándar media de los errores de predicción del tráfico durante el periodo de proyecto, y por otra la desviación estándar de los errores en la predicción del comportamiento del pavimento (expresado en ejes de 8.2 t) al alcanzar un determinado índice de servicio terminal.

**D**= Espesor del pavimento de hormigón (en pulgadas).

**ΔPSI**= Diferencia entre los índices de servicio inicial y final.

**P<sub>t</sub>**= Índice de servicio final.

**S<sub>c</sub>**= Resistencia media del hormigón (en psi, libras por pulgada cuadrada) a flexo tracción a los 28 días (método de carga en los tercios de luz).

**C<sub>d</sub>**= Coeficiente de drenaje.

**J**= Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas.

**E<sub>c</sub>**= Módulo de elasticidad del hormigón, en psi.

**K**= Módulo de reacción o de balasto (en psi, libras por pulgada cúbica) de la superficie (base, sub-base o subrasante) en la que se apoya el pavimento de hormigón.

El método de diseño para estructuras de pavimento que propone la AASHTO en la edición de 1993, se basa principalmente en la información y en los datos empíricos obtenidos de la prueba AASHTO Road Test, llevada a cabo durante el periodo de 1958 a 1960 en Ottawa Illinois. “El objetivo principal de esta prueba fue determinar relaciones significativas entre el comportamiento de varias secciones de pavimento y las cargas aplicadas sobre ellas que pudiesen ser usadas en el desarrollo de criterios y procedimientos de diseño de pavimentos”.

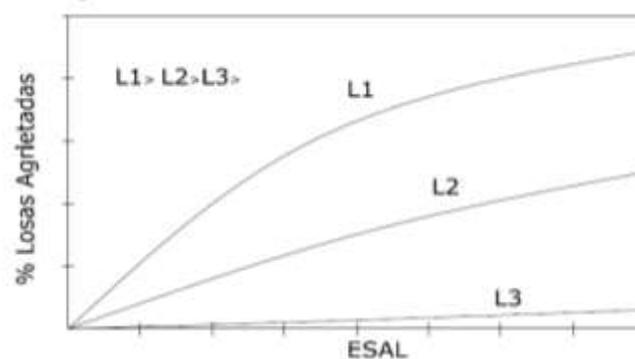
De la evaluación de ambos métodos se ha determinado que en losas con longitudes inferiores a 450 cm reflejan mejores resultados respecto a su comportamiento mecánico, así como la disminución de espesores, ya que las losas se ven sometidas a menores cargas y sollicitaciones, en función de la estandarización de las dimensiones de los diferentes tipos de vehículos, que se ve reflejado en el número de ejes equivalentes a los que son sometidas cada una de las losas.

## **2.5 DETERMINACIÓN DE LA IMPORTANCIA DE LA LONGITUD Y FORMA GEOMÉTRICA DE LA LOSA**

De lo anterior se deriva la influencia de la forma geométrica de la losa, pasando de ser la tradicionalmente de geometría rectangular, a una geometría cuadrada; teniendo como finalidad que su longitud concentre la menor cantidad de puntos de esfuerzos, evitando en lo posible las fallas tanto transversales como longitudinales. Según experiencias en

Latinoamérica donde se ha evaluado el agrietamiento de losas de forma geométrica cuadrada con diferentes longitudes, se ha establecido la influencia de los esfuerzos respecto a ejes equivalentes de 18,000 lb (ESAL) como se muestra en la figura.

Gráfico 2.1 Comportamiento de agrietamiento en losas en función de la longitud



Fuente: Elaboración propia

## 2.6 NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS

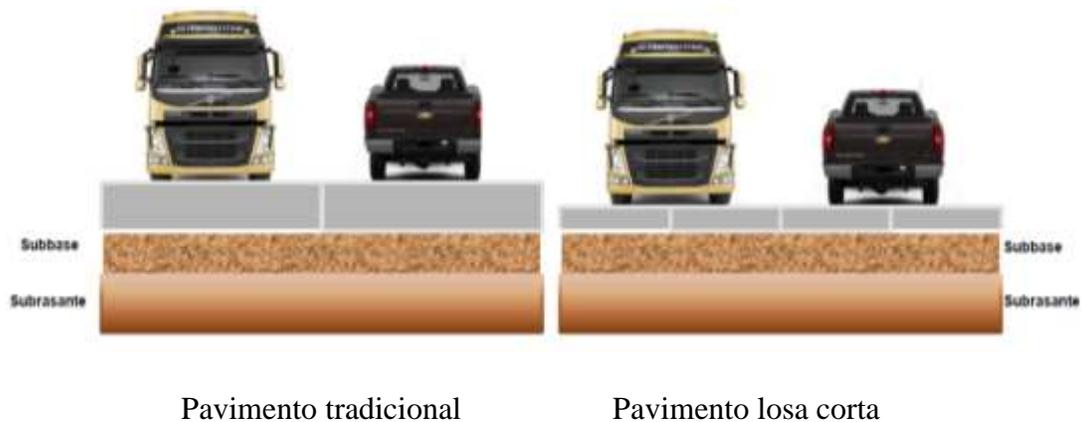
### 2.6.1 Sistema de losas cortas

En los últimos años, el estudio de las losas de concreto y su comportamiento han dado como resultado la aplicación de nuevas tecnologías para el diseño de carreteras. Este sistema consiste en rediseñar las dimensiones de las losas, losas tradicionales que generalmente están entre los 4.50m por 3.60m a losas cortas de dimensiones menores. Debido a este redimensionamiento se pueden disminuir los espesores de las capas de concreto para las carpetas de rodadura, además, se deja a un lado la utilización de acero de refuerzo, lo que ha reducido los precios en la construcción de pavimentos de concreto hidráulico.

El largo y ancho de las losas tiene un importante efecto en las tensiones en el hormigón, que es la causa del agrietamiento producido por fatiga. También tiene un efecto la posición de las ruedas sobre las losas. Esta combinación de posición de las ruedas y la geometría de las losas es una innovación que está protegida por solicitudes de patente presentadas a nivel mundial.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Dr. Juan Pablo Covarrubias, Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, ICCH 2007

Esquema 2.11 Pavimentos de hormigón tradicionales vs pavimentos de losa corta



Fuente: Congreso Iberoamericano de pavimentos de hormigón (Puerto Iguazú, Argentina 2015)

La tecnología de diseño y construcción de losas, dimensiona éstas de forma tal que ellas nunca sean cargadas por más de un set de ruedas del camión, logrando con esto disminuir significativamente las tensiones en dicha losa.<sup>3</sup>

Utilizar dimensiones de losas más pequeñas produce un menor agrietamiento de las mismas y una mayor tolerancia a la carga por eje del camión.

Esquema 2.12 Comparación en planta de una losa tradicional respecto a una la losa corta



Fuente: Congreso Iberoamericano de pavimentos de hormigón (Puerto Iguazú, Argentina 2015)

<sup>3</sup> Dr. Juan Pablo Covarrubias, Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, ICCH 2007

### 2.6.2 Consideraciones del sistema de losas cortas

La investigación del método de losas cortas habla de los esfuerzos que sufren las losas debido al alabeo y a la posición de los ejes traseros y delanteros de vehículos pesados en los bordes. Se consideran factores de deformaciones por alabeo, por la rigidez de las bases, del largo de las losas, tensiones propias del concreto y del efecto de adherencia.

Posición de las cargas y dimensión de las losas

Esquema 2.13 Concepto tradicional



Esquema 2.14 Concepto de losa



Fuente: Instituto del cemento y del hormigón de Chile – ICH junio de 2012

### 2.6.3 Descripción del método constructivo de losas cortas

El método constructivo de losas cortas en pavimentos de concreto hidráulico brinda otra alternativa técnica para la construcción de pavimentos rígidos, estableciendo como base fundamental para la concepción del método, la reducción de esfuerzos de flexión en las losas de la estructura del pavimento.

También busca el menor número de repeticiones de carga por eje, basados en un análisis de fatiga del concreto, reduciendo el agrietamiento, evitar la falla por bombeo en las losas y el problema en las juntas durante el periodo de diseño.

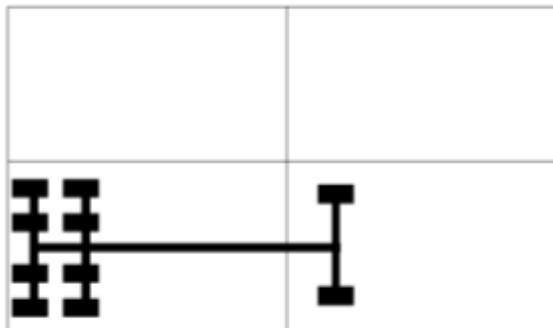
Debe considerarse la posibilidad de evaluar losas de concreto hidráulico con refuerzo de acero o bien simples (sin refuerzo).

El método de losas cortas ha tomado y analizado los resultados de la evaluación de elementos finitos por medio de programas o software, los cuales utiliza elementos de un análisis de Métodos empírico mecanicista de diseño.

Para la realización del análisis de elementos finitos se contemplan la evaluación de diferentes variables, principalmente estructurales, materiales y medio ambiente.

Entonces si la finalidad del análisis de elementos finitos en losas cortas es la distribución de cargas y el comportamiento que tiene en las mismas los efectos de alabeo provocado por los gradientes térmicos, hace necesario reflejar la importancia que tiene la distancia entre las juntas longitudinales y transversales en el pavimento terminado, como se muestra en la figura 2.20

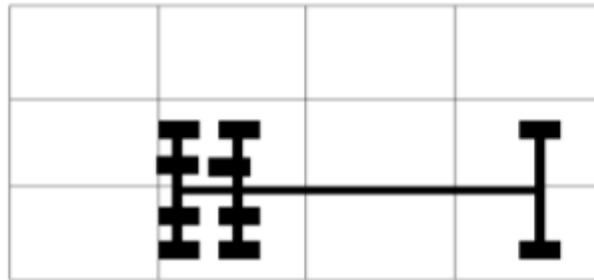
Gráfico 2.2 Ubicación de ejes vehiculares de diseño y sus cargas en losas largas rectangulares de 450 X 350cm



Fuente: Elaboración propia

Redistribuyendo las cargas sin concentrar la mayoría de las cargas solamente en una sección de la losa, se propone:

Gráfico 2.3 Ubicación de ejes vehiculares de diseño y sus cargas en losas cortas cuadradas de 180 cm



Fuente: Elaboración propia

## 2.7 FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

### 2.7.1 Efecto de la rigidez de la base en el largo del voladizo y tensiones de tracción

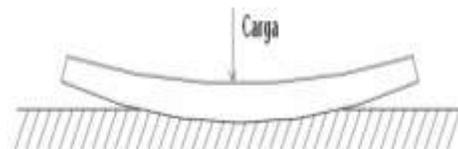
En el diseño AASHTO, se considera como óptimo un largo de losa de 4,5 metros, con un ancho igual al ancho de la pista. Esta dimensión de la losa hace que el camión la pise con el eje delantero en un borde y los ejes traseros en el otro borde.

En el sentido transversal, las ruedas de un lado del camión pisan cerca de un borde y las del otro lado cerca del otro borde. En ambos casos el camión “plancha” la losa generando las grietas transversales y longitudinales.

Esquema 2.15 Esquema de alabeo de una losa



Esquema 2.16 Forma de cargar la losa



Fuente: Dr. Juan Pablo Covarrubias, pavimentos delgados de hormigón

Al alabearse la losa y levantar sus bordes, su apoyo en la base es un círculo (Ver imagen 2.25) cuya dimensión depende de la rigidez de la base. Si la base es muy rígida, el círculo será pequeño y los voladizos largos.

Esto genera tensiones de tracción altas en la cara superior, cuando la losa es pisada por un camión. Al revés, si la base es muy poco rígida, el círculo rojo será mayor y el largo del voladizo menor, por lo tanto, en este caso las tensiones de tracción en la cara superior serán menores, pero aumentarán las tensiones de tracción en la cara inferior, cuando el camión pisa el centro de la losa. Lo aconsejable es trabajar con valores soporte del suelo entre 30 y 50% para encontrar una rigidez ideal.

Esquema 2.17 Alabeo medido en una losa de piso industrial

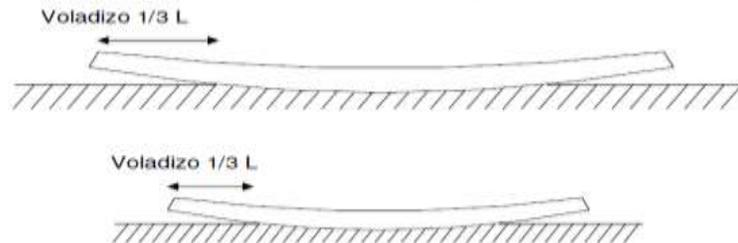


Fuente: Dr. Juan Pablo Covarrubias, pavimentos delgados de hormigón

### 2.7.2. Efecto del largo de la losa

Cuando una losa se alabea generalmente deja un voladizo que es aproximadamente un tercio de su longitud. Por lo tanto, cuanto mayor sea la losa, mayor será el voladizo que se generará. Es por lo mismo que se recomienda reducir las dimensiones de las losas.

Esquema 2.18 Efecto del largo de la losa



Esquema 2.19 Voladizo creado por la rigidez de las bases

Fuente: Dr. Juan Pablo Covarrubias, pavimentos delgados de hormigón

### 2.7.3. Efecto del alabeo en las losas de concreto

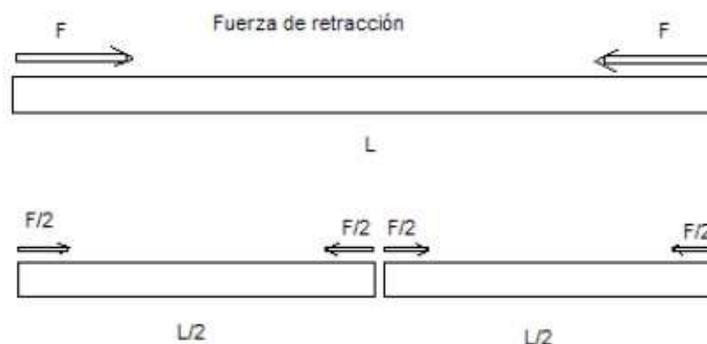
El alabeo se produce por una fuerza ubicada en la superficie de la losa, la cual se origina por el secado y la retracción causada por un diferencial térmico en la misma superficie de concreto.

El alabeo causado por secado se debe a un diferencial de humedad entre la parte superior e inferior de la carpeta, la parte superior siempre está seca mientras que la parte inferior se encuentra bajo la acción de la humedad de la tierra condensada bajo el pavimento. Esto produce un alabeo hacia arriba.

El alabeo por construcción se reduce considerablemente con la aplicación de buenas prácticas constructivas.

La colocación del concreto en la tarde reduce el alabeo por retracción térmica de la losa, si se efectúa durante las horas más calurosas del día la parte superior de la carpeta se secará y endurecerá a mayor velocidad. Mientras mayor sea la longitud de la losa, mayores fuerzas de alabeo se presentarán.

Esquema 2.20 Las losas de menor longitud tienen menores fuerzas de superficie, lo que disminuye el alabeo



Fuente: Dr. Juan Pablo Covarrubias, pavimentos delgados de hormigón

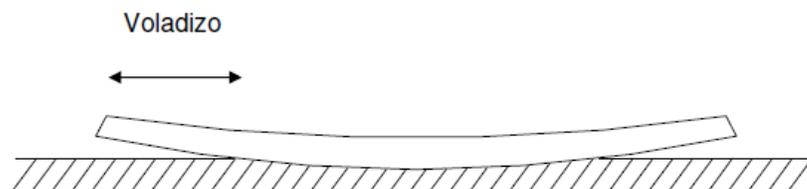
#### 2.7.4. Rigidez de las bases

Una base muy rígida reduce el apoyo que la losa tendrá sobre la base al momento de que se produzca el alabeo, lo cual generará voladizos de mayor tamaño. Cuando una carga es aplicada en los bordes de la losa se producirán grandes esfuerzos de tensión en la superficie y grietas de la superficie hacia abajo.

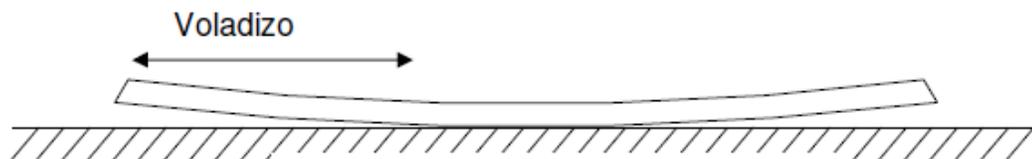
Si la base es muy blanda, una carga en el centro de losa producirá esfuerzos por tensión en la base de la losa y grietas desde la base hacia arriba, debido a que la losa estará completamente apoyada y se deformará sobre una superficie deformable.

Lo aconsejable es trabajar con valores soporte del suelo entre 30 y 50% para encontrar una rigidez ideal.

Esquema 2.21 Voladizo creado por la rigidez de las bases (base granular. CBR 40%)



Esquema 2.22 Voladizo creado por la rigidez de las bases tratada (base tratada con cemento)

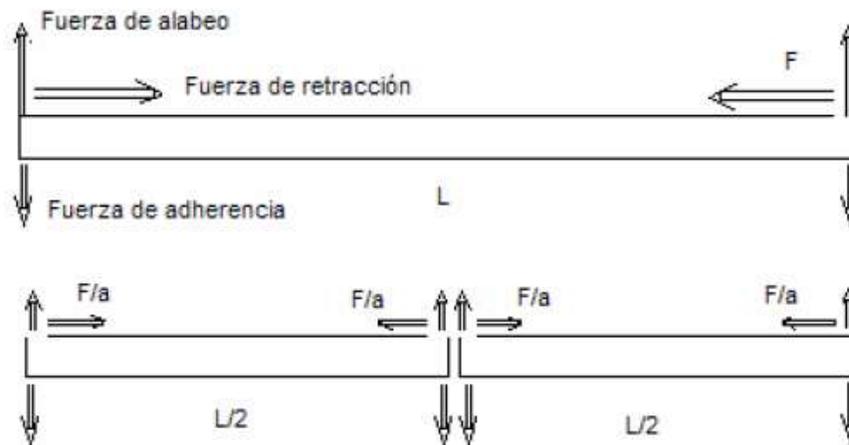


Fuente: Dr. Juan Pablo Covarrubias, pavimentos delgados de hormigón

### 2.7.5. Efecto de adherencia

El alabeo hace que se levanten los bordes de las losas del pavimento. Para compensar esta fuerza, la adherencia brinda una fuerza vertical contraria a la del alabeo. Si la fuerza de adherencia es igual o mayor al alabeo hará que la losa se mantenga plana sobre la base, es decir, no habrá voladizo ni esfuerzos de tracción en la carpeta. Durante la construcción se debe tener cuidado especial en tratar de obtener la máxima adherencia de la losa a su base.

Esquema 2.23 Efecto de la adherencia en las losas de concreto



Fuente: Dr. Juan Pablo Covarrubias, pavimentos delgados de hormigón

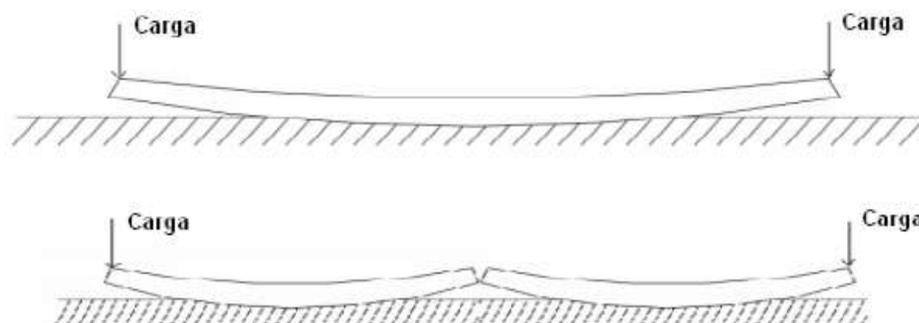
### 2.7.6. Tensiones en losas cortas

Podemos apreciar que en losas de largo y ancho tradicional, los ejes delanteros y traseros y las ruedas de un mismo eje de los camiones se posan y cargan la losa en los bordes, planchándolas cuando tienen los bordes levantados.

Esta posición de las cargas genera tensiones de tracción en la cara superior de las losas, generando grietas que se inician de arriba hacia abajo.

Cuando la losa tiene un largo menor a la distancia ente los ejes delantero y trasero del camión o un ancho menor a la distancia entre ruedas de un mismo eje, como indican los diseños de pavimentos delgados, las losas son cargadas con un set de ruedas por losa. Esto disminuye en forma importante las tensiones en el hormigón, disminuyendo el consumo de fatiga por pasada y mejorando el comportamiento.<sup>4</sup>

Esquema 2.24 Efecto de la configuración geométrica de las cargas vs las losas (cada carga representa una rueda del camión)

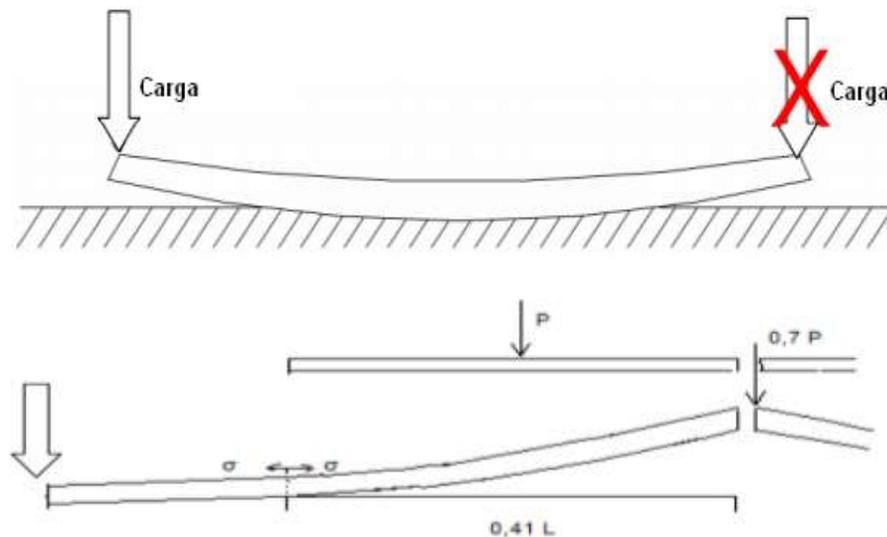


Fuente: Dr. Juan Pablo Covarrubias, pavimentos delgados de hormigón

Sin embargo, se debe considerar el peso del hormigón de la losa. Cuando la losa es cargada en uno de sus bordes, el otro se levanta, levantando la losa siguiente. Esto se muestra en la figura siguiente. En este caso, el peso de la losa produce tensiones en la cara superior en el punto de apoyo. Considerando un voladizo de 0,41 veces el largo, tomado de mediciones en USA. Se puede apreciar que los valores de estas tensiones son altas y del mismo orden de magnitud que las tensiones producidas por las cargas. Esto ha evitado hasta ahora poder tener pavimentos de hormigón delgados. Se puede también apreciar que al acortar las losas, estas tensiones disminuyen su magnitud a valores bastante menores a los de las cargas. Para este análisis se consideró un traspaso de cargas de 70% entre losas.

<sup>4</sup> Dr. Juan Pablo Covarrubias, Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, ICCH 2007

Esquema 2.25 Nueva configuración geométrica con una carga por losa



Fuente: Dr. Juan Pablo Covarrubias, pavimentos delgados de hormigón

## 2.8 PROPIEDADES DE PAVIMENTO RÍGIDO

El concreto que se empleará en este tipo de pavimentos deberá ser durable y resistente a las cargas y al desgaste.

Es necesario que cada una de estas propiedades se tenga en cuenta cuando se haga el diseño de la mezcla, por fortuna estas propiedades están ligadas directamente entre si esto es si un concreto es fuerte es lógico suponer que sea durable y resistente al desgaste.

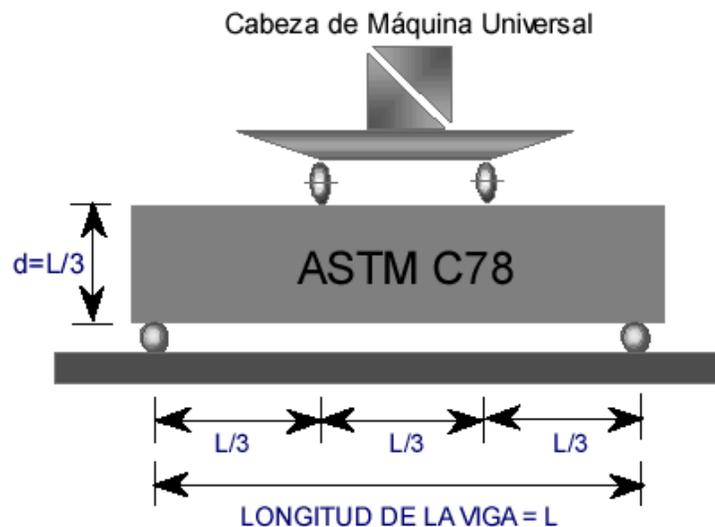
Propiedades del Concreto: Son tres las propiedades del concreto que influyen en el diseño y en su comportamiento a lo largo de su vida útil:

- Resistencia a la tensión por flexión ( $S'c$ ) ó módulo de ruptura (MR)
- Módulo de elasticidad del concreto ( $E_c$ )
- Durabilidad

**2.8.1 Módulo de ruptura (MR).**- Los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión, se recomienda que su especificación de resistencia sea trabajando a flexión, que se conoce como resistencia a la flexión por tensión ( $S'c$ ) o módulo de ruptura (MR) normalmente especificada a los 28 días.

El módulo de ruptura se mide mediante ensayos de vigas de concreto aplicándoles cargas en los tercios de su claro de apoyo. Esta prueba está normalizada por la ASTM C78. Existe una prueba similar con la aplicación de la carga al centro del claro que genera resultados diferentes de resistencia a la flexión (aprox. 15% a 20% mayores) pero que no son los que considera AASHTO para el diseño.

Esquema 2.26 Esquema de medida del módulo de rotura ASTM C78



Fuente: “Pavimentos rígidos” Universidad Nacional de Colombia

Los valores recomendados para el módulo de ruptura varían desde los  $41 \text{ kg/cm}^2$  (583 psi) hasta los  $50 \text{ kg/cm}^2$  (711 psi) a 28 días dependiendo del uso que vayan a tener. En seguida se muestran valores recomendados, sin embargo el diseñador deberá elegir de acuerdo a un buen criterio.

De la resistencia promedio a la flexión del concreto (módulo de ruptura), el ACI especifica que este no debe ser menor de  $45 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días de edad.

Pero si las características previamente conocidas de los cementos y agregados disponibles, indican que es difícil obtener esta resistencia económicamente, puede especificarse una resistencia promedio a la flexión de 42 kg/cm<sup>2</sup> siempre y cuando el peralte de la losa se diseñe de acuerdo con esta resistencia.

Tabla 2.1 Recomendaciones para módulos de ruptura

Tipo de pavimento	MR recomendado	
	kg/cm <sup>2</sup>	psi
Autopistas	48.0	682.7
Carreteras	48.0	682.7
Zonas industriales	45.0	640.1
Urbanas principales	45.0	640.1
Urbanas secundarias	42.0	597.4

Fuente: Pavimentos rígidos, Universidad Nacional de Colombia

Según el comité ACI, la resistencia promedio a la compresión del concreto a los 28 días no será menor de 280 kg/cm<sup>2</sup> esta resistencia se toma como base para el diseño de la pasa junta y los tensores.

**2.8.2 Módulo de elasticidad del concreto (Ec).**- Está íntimamente relacionado con su módulo de ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469. Existen varios criterios con los que se puede estimar el módulo de elasticidad a partir del módulo de ruptura.

Los dos más utilizados son:

$$E_c = 6,750 * MR$$

$$E_c = 26,454 * MR ^{0.77}$$

Estas fórmulas aplican con unidades inglesas.

**2.8.3 Durabilidad.-** En lugares donde el concreto está sujeto a condiciones severas de congelamiento y deshielos, deberá usarse concreto con aire incluido, y el proporcionamiento será tal que el agua de mezclado incluyendo el agua libre en los agregados, pero sin considerar el agua absorbida por estos, no debe exceder de 0.53 litros por kg de cemento.

En ningún caso el agua de mezclado excederá de 0.58 litros por kg de cemento en una revoltura, el contenido de cemento no será menor de 280 kg por metro cúbico de concreto.

## **2.9 CARACTERÍSTICAS DEL PAVIMENTO RÍGIDO**

Son muchas las características del pavimento rígido donde algunas de ellas hacen críticas en determinadas circunstancias. Sin embargo, desde un punto de vista general son dos las propiedades principales de mayor envergadura. La primera es la relativa a la consistencia o grado de fluidez del material en estado fresco, la cual se conoce como manejabilidad, ductilidad, trabajabilidad, asentamientos, entre otros. La segunda es el grado de endurecimiento o resistencia capaz de adquirir el concreto.

La fluidez suele medirse con ensayos que evalúan el grado de plasticidad de la mezcla. La resistencia se determina mediante ensayos mecánicos de compresión o tracción sobre las probetas normalizadas. Con los resultados a la compresión el conocedor puede hacer estimaciones sobre la resistencia a otros tipos de tensiones, tales como la flexión, corte o tracción.

Las características que se pueden observar de un pavimento de concreto so deben principalmente a la estructura y propiedades de este material, se mencionan a continuación algunas de esas características:

**2.9.1 Alta resistencia.-** El pavimento de concreto posee una alta resistencia a la flexión y compresión; estas dependen principalmente del material (cemento) en combinación con los agregados pétreos que la conforman. Aquella, simplemente no puede ser alcanzada por un asfalto debido a las características de sus materiales.

**2.9.2 Rigidez.-** La rigidez o inflexibilidad, está en función de la resistencia del concreto en forma de losas y del módulo de elasticidad del concreto (E). Esta característica de las losas, es la que da precisamente el nombre al tipo de pavimento, ya que, como se menciona más adelante, es la encargada de resistir la mayoría de los esfuerzos y deformaciones que se producen por efecto del tránsito y transmite niveles de carga sumamente bajos al terreno de apoyo, es decir a la subbase, la subrasante y las terracerías.

**2.9.3 Estabilidad de la superficie de rodamiento.-** Resulta fuera de toda duda que la característica más importante de un pavimento rígido, desde el punto de vista del usuario, es la calidad de la superficie de rodamiento, ya que, si se siguen las técnicas de construcción adecuadas y las normas técnicas, que para el caso se sugieren, nos proporcionará una superficie plana, de mayor estabilidad y seguridad en el manejo. Las superficies de un pavimento de concreto son altamente estables y seguras.

**2.9.4 Color.-** Tal vez, ésta característica sea despreciada por muchos proyectistas de pavimentos a la hora de hacer una elección por uno de asfalto o de concreto, pero se ha demostrado que el color natural que da el cemento Portland al concreto, hace que éste posea una alta refractancia a la luz; tal vez en algunas horas del día puede ser un poco molesto pero en la noche hace que el pavimento de concreto sea mucho más visible que el asfáltico, y esto representa un enorme ahorro en cuanto a iluminación y al mantenimiento de éste.

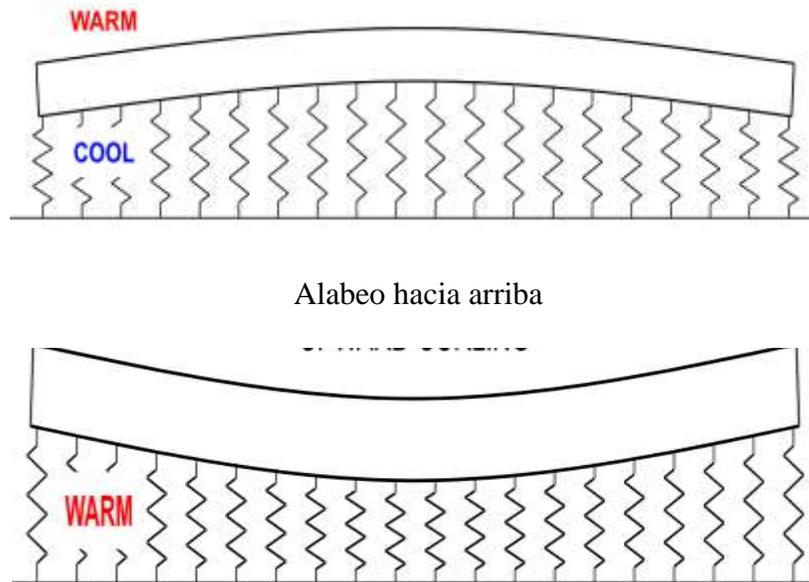
## **2.10 ESFUERZOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS**

### **2.10.1 Esfuerzos debido al alabeo de la losa**

Durante el día cuando la temperatura en la parte más alta de las losas es mayor que en el fondo, la parte de encima tiende a expandirse con respecto al eje neutro durante el cual el fondo tiende a contraerse. Sin embargo, el peso de la losa restringe la expansión y la contracción de la misma, de esta manera, el esfuerzo de compresión son inducidos en lo alto de la losa cuando el esfuerzo de tensión ocurre en el fondo.

En la noche cuando la temperatura en la parte superior de la losa es inferior que en el fondo, la parte superior tiende a contraerse con respecto al fondo, así, el esfuerzo de tensión son inducidos en la parte superior y los esfuerzos de compresión en la parte inferior.

Esquema 2.27 Curvatura debido al gradiente de temperatura alabeo hacia abajo



Fuente: Método empírico mecanicista de diseño de pavimentos y estructuras

Otra explicación de los esfuerzos debido al alabeo puede ser hecha por la teoría de placa sobre una fundación líquida (Winkler). Una fundación líquida se caracteriza por una serie de resortes anexos a las placas. Cuando la temperatura en la parte alta de la losa es mucho mayor que en el fondo, la parte alta es más larga que el fondo y la losa se curva hacia abajo. Los resortes de los bordes de afuera están en compresión y empujan la losa hacia arriba donde los resortes en el interior están en tensión y halan la losa hacia abajo. Como resultado, en lo alto de la losa se encuentra en compresión y el fondo está en tensión.

Cuando la temperatura en lo alto es más bajo que en el fondo, la losa se curva hacia arriba. Los resortes exteriores halan la losa abajo y donde los resortes interiores empujan la losa hacia arriba, así resulta en tensión en lo alto y compresión en el fondo.

Westergaard (1926) desarrollo ecuaciones para la determinación de los esfuerzos debido a la curvatura en pavimentos de concreto basados en la teoría de la placa.

## **2.11 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

El método de los elementos finitos es un método numérico utilizado frecuentemente para obtener la solución aproximada de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, permitiendo encontrar soluciones apropiadas para diversos campos de la ingeniería, uno de los tópicos en el que se utiliza más comúnmente es en los problemas físicos que poseen geometrías muy complicadas lo que hace necesario el uso de un computador para llevar a cabo la implementación del método.

El método es altamente utilizado ya que permite obtener una solución numérica aproximada sobre el comportamiento de una estructura, sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales que se encargan de definir el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí, esto se denomina elementos finitos.

Dentro de cada elemento se encuentran una serie de puntos que permiten el movimiento de cada elemento, estos puntos son denominados nodos y son adyacentes entre ellos si pertenecen al mismo elemento, también un nodo sobre la frontera puede pertenecer a varios elementos, el conjunto de nodos y las relaciones que existen entre ellos constituyen una malla, esta malla es de gran importancia ya que a partir de esta se realiza la discretización del dominio en elementos finitos, y a su vez permite realizar los cálculos sobre cada uno de los nodos. La construcción de la malla generalmente se realiza a partir de programas especializados.

El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable y los nodos se puede expresar como un sistema de ecuaciones donde el número de ecuaciones es proporcional al número de nodos, este sistema también puede ser escrito como una matriz llamada matriz de rigidez global.

Generalmente el método de elementos finitos se programa computacionalmente para calcular los desplazamientos, las deformaciones y tensiones cuando se trata de un problema de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. Dada la dificultad de encontrar la solución a estos problemas de manera analítica, con frecuencia en la práctica los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en una herramienta alternativa para encontrar estas soluciones, ya que la convergencia de esta metodologías puede decirse es buena.

### **2.11.1 Respuesta del modelado estructural del pavimento rígido**

Para la realización de la metodología de diseño debemos tomar en cuenta lo siguiente:

La selección del programa de elementos finitos para el desarrollo de la estructura del modelo.

El desarrollo de modelos de elementos finitos para determinar los esfuerzos críticos en las losas del pavimento.

### **2.11.2 Selección de programa de elementos finitos**

El rendimiento de los pavimentos rígidos depende de los esfuerzos y deformaciones impuestas por repeticiones de cargas de tráfico y ambientales. Por ejemplo, el agrietamiento transversal en los pavimentos JPCP se rige por los máximos esfuerzos de tracción (tensión) en la parte inferior de la losa de concreto. Por lo tanto, predicciones fiables de las respuestas del pavimento son esenciales para la realización de un diseño adecuado. El modelo estructural utilizado para esas predicciones se debe cumplir los siguientes requisitos:

- El modelo debe describir adecuadamente la estructura del pavimento (capas construidas y subrasante).
- El modelo debe tener en cuenta las discontinuidades en las estructuras de pavimento (juntas).
- El modelo debe ser capaz de analizar múltiples carga de ruedas.
- El modelo debe ser capaz de analizar la carga del medio ambiente (como el alabeo debido a la temperatura y la deformación por humedad).

La utilización de métodos de elementos finitos permite el desarrollo de modelos estructurales que satisfagan todos estos requisitos. En la actualidad existen una variedad de programas de elementos finitos, para la utilización en el modulado de los pavimentos.

Estos programas se pueden dividir en programas de elementos finitos de propósito general y de elementos finitos de códigos desarrollados específicamente para el análisis de sistemas de pavimentos.

Estos programas han sido utilizados con éxito para el análisis de pavimento en varios estudios de investigación, y una diversidad de modelos fueron construidos en la actualidad con estos productos. Sin embargo, estos programas suelen exigir considerable recursos computacionales, así como el tiempo para el desarrollo de un modelo estructural para cada problema.

Los programas desarrollados especialmente para el análisis de los sistemas de pavimentación de concreto incluyen:

- ILLI-SLAB (Tabatabaie y Barenberg 1980)
- WESLIQID (Chou 1981)
- J-LOSA (Tayabji y Colley, 1983)
- FEACONS-IV (Choubane y Tia 1995)
- KENSLAB (Huang 1993)

- KOLA (Kok 1990)
- EVERFE (Davids, Turkiyyah y Mahoney 1998)

La mayoría de estos programas pueden analizar múltiples ruedas de carga, de una o más capas que descansa sobre una fundación Winkler (Fundación sólida elástica). Para la realización de nuestra investigación ocuparemos el programa Everfe 2.24.

### **2.11.3 Descripción del programa Everfe**

Everfe es una herramienta de análisis de elementos finitos 3D para pavimentos rígidos, desarrollado en la universidad de Washington en cooperación con el

Departamento de Transporte de Washington. En la actualidad, Everfe es el programa finito 3D más sofisticado y fácil de usar, con elementos específicamente desarrollado para el análisis de pavimento rígido.

El programa cuenta con una interfaz gráfica de usuario intuitiva que simplifica en gran medida la generación de modelos, y la interpretación de los resultados que se visualizan a través de Everfe; además que incorpora una novedosa técnica para el modelado de trabazón de agregado que puede ser lineal y no lineal en la junta, así como un nuevo método para el modelado de barras para la transferencia carga en las juntas transversales. Una estrategia de solución avanzada empleada por Everfe que permite modelos realistas 3D que pueden ser simulados, sin la necesidad de tener computadoras de gran capacidad. Sin embargo, Everfe tiene limitaciones significativas.

## **2.12 ENSAYOS DE RESISTENCIA TRADICIONALES PARA LA EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS**

### **2.12.1 Examen de las condiciones que exhibe un pavimento**

Este aspecto es tan antiguo como la utilización misma de los caminos y constituyen en sí la primera forma de investigación que permitió la acumulación de la experiencia, a través de la observación del comportamiento del pavimento bajo diferentes situaciones. El examen y análisis de las condiciones que exhibe un pavimento proporciona la información necesaria para valorar el papel que desempeña cada elemento que lo constituye, en el comportamiento integral del pavimento, constituyendo una de las herramientas básicas en el conocimiento de la ingeniería de los pavimentos.

Los pavimentos fracasan a menudo debido a una combinación de varias razones, en ocasiones, difíciles de determinar, siendo por lo tanto necesario que las inspecciones del estado del pavimento se realicen por personal experimentado, para conocer la causa del fracaso. Al respecto es indispensable conocer los tipos y causas de fallas en los pavimentos.

Las inspecciones se realizan con mayor detalle que el requerido para la calificación de un tramo, e incluye un registro de la ubicación, magnitud y tipo de los deterioros observados, así como tipo y condiciones de los trabajos de mantenimiento.

### **2.12.2 Pruebas destructivas**

Es necesario en ocasiones, observar directamente la estructura de un pavimento con el objeto de determinar dónde y por qué ocurrió una falla. En tales situaciones se requiere excavar una calicata o una trinchera en el pavimento, destruyendo su estructura.

Las técnicas empleadas dependen del tipo de información requerida, llegando a ser necesaria la obtención de muestras inalteradas de las diferentes capas.

Las observaciones de las paredes del corte pueden aclarar el mecanismo de falla y pruebas ejecutadas en las muestras obtenidas proporcionarán información sobre la capacidad estructural del pavimento.

Adicionalmente se requiere evaluar todas las variables que afectan el comportamiento del pavimento, antes de establecer una conclusión.

Actualmente se llevan a cabo estudios de evaluación total del tipo de comportamiento funcional, como mecanicista. Los métodos de investigación mediante sistemas destructivos se emplean en casos muy especiales. Algunos de los tópicos actualmente en investigación en este campo son los siguientes:

- Desarrollar métodos de evaluación más rápidos y confiables.
- Establecer técnicas de control de acabados superficiales durante la construcción.
- Mejorar el concepto de índice de servicio
- Aumentar el conocimiento acerca de las propiedades mecánicas de los pavimentos y de sus componentes por métodos destructivos.

### **2.12.3 Pruebas no destructivas**

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

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

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

- Mediciones de respuesta bajo cargas estáticas o móviles, aplicadas a baja velocidad.
- Mediciones de respuesta a la aplicación de cargas repetidas.
- Mediciones de respuestas de una masa a una fuente de energía nuclear.

La respuesta a la aplicación de una carga sencilla en la superficie del pavimento es medida por un dispositivo denominado viga Benkelman, medidor portátil desarrollado en el tramo de prueba AASHTO, que determina deflexiones de milésimas de pulgada.

Los resultados de un estudio efectuado en California indican que cuando las deflexiones de la superficie de un pavimento flexible exceden de un cierto valor, ese pavimento generalmente muestra signos de deterioro.

La comparación de las deflexiones medidas, con relación a un valor de una deflexión crítica; proporcionara un medio para evaluar el mantenimiento de los pavimentos.

Por otra parte, los estudios realizados en el tramo de prueba AASHTO indicaron que en el caso de pavimentos flexibles existe una relación entre las deflexiones producidas y su comportamiento, por lo que este método puede utilizarse como un medio de evaluar el comportamiento de un pavimento. Puede señalarse que la viga Benkelman es un instrumento sencillo de operar, pero existen variables como la temperatura del pavimento y el radio de curvatura de la deflexión producida, que requieren ser tomadas muy en cuenta en la interpretación de los resultados.

Instalando dispositivos especiales dentro de la estructura del pavimento ha sido posible medir las deflexiones producidas al paso de cargas repetidas en movimiento. Los citados dispositivos deben instalarse permanentemente en el pavimento, no estando aun aclarada la influencia, en los resultados obtenidos de un dispositivo que es diferente al medio que lo rodea.

En el tramo de prueba AASHTO se realizaron mediciones de vibraciones producidas a pavimentos flexibles, al aplicar en la superficie una fuerza vertical alternante y midiendo posteriormente las deflexiones y la velocidad de proyección de las ondas.

Las primeras proporcionan un valor de la rigidez elástica de la estructura total del pavimento, en tanto que la segunda puede proporcionar idea de la rigidez de las varias capas que lo integran. El cuerpo de Ingenieros de E.U.A ha empleado un equipo vibratorio para determinar el módulo de elasticidad del suelo bajo un pavimento siguiendo el método desarrollado por la Compañía Soell de Holanda. A partir del valor del módulo obtenido y aplicando la teoría de la elasticidad puede determinarse la resistencia del pavimento.

El equipo empleado es de tipo móvil y el tiempo requerido para la ejecución de las pruebas es bastante corto, lo que constituyen factores favorables para su aplicación.

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

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

La valuación final de la capacidad estructural deberá tener en consideración los resultados obtenidos con el uso de los dos criterios, deflexión y resistencia, lo cual es, particularmente importante si se toma en cuenta que las correlaciones existentes entre las medidas de deflexión, espesor y calidad de los pavimentos, así como el tránsito que circula por ellos, han sido obtenidos por diversas agencias bajo sus propias condiciones locales y, por lo tanto fundamentar la valuación solo en dichas correlaciones podría resultar poco fiel a las condiciones particulares del problema que se estuviese tratando. El método de las deflexiones maneja el valor total de ellas en cada punto, pero no su distribución en profundidad, que es la característica realmente importante y en esto radica, su mayor limitación.

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

### 3.1 METODOLOGÍA Y DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Para la realización de este trabajo de investigación se plantea determinar los esfuerzos y deformaciones críticas generadas en las losas del pavimento; impuestas por repeticiones de cargas de tráfico y condiciones ambientales.

El proyecto implicará la ejecución de tres metodologías para la obtención de los valores, que nos servirán de base para elaborar un análisis del desempeño de las losas de pavimento, para ello se procedió previamente a recolectar y registrar los datos preliminares que nos servirán de base para el correcto desarrollo de cada una de las metodologías planteadas, las cuales se detallan a continuación:

- Aplicación del método de elementos finitos que permite el desarrollo de modelos estructurales, para determinar los esfuerzos críticos en las losas del pavimento.
- Para la realización de nuestra investigación ocuparemos el programa Everfe 2.24.
- Los valores empleados en esta metodología de investigación, serán los que ya están definidos por los distintos parámetros, en el diseño del pavimento rígido que actualmente se encuentra en funcionamiento en las zonas de estudio, siendo estos una base para la aplicación de este método, el cual nos permite desarrollar la simulación de modelos de prueba, con el programa computacional (Everfe).
- Con los resultados obtenidos a través de las simulaciones en el programa computacional, el cual mediante un sistema de ecuaciones, nos permite obtener valores de deformaciones y esfuerzos para diferentes configuraciones geométricas de losas, se podrá elaborar predicciones de la respuesta de los pavimentos ante los esfuerzos aplicados por las cargas.

### **3.1.1 Pavimento rígido área urbana de la ciudad de Villamontes**

#### **3.1.1.1 Ubicación**

La localidad de Villamontes, se encuentra ubicada en la provincia Gran Chaco del Departamento de Tarija, a 289 Km de la ciudad.

El pavimento rígido abarca gran parte del trazo urbano de la población de Villamontes, las zonas comprendidas en los Barrios Bolívar, Pilcomayo, Avaroa, Ferroviario, El Chañar y Litoral.

El Municipio de Villa Montes, se encuentra ubicado entre las coordenadas 21°00 y 22°14' de Latitud Sud y 62 °17' y 64° 00' de Longitud Oeste.

#### **3.1.1.2 Resumen climatológico**

El clima de Villamontes se clasifica como cálido y templado. Los veranos aquí tienen una buena cantidad de lluvia, mientras que los inviernos tienen muy poco. La temperatura promedio en Villamontes es 24° C. La precipitación media aproximada es de 787 mm.

Las temperaturas son más altas en promedio en enero, alrededor de 28.8 ° C. julio es el mes más frío, con temperaturas promediando 17.1 ° C.

Tabla 3.1 Datos históricos del tiempo de la ciudad de Villamontes

	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media (°C)	28.8	28.4	25.1	22.4	20.4	18.3	17.1	20.9	23.2	26.7	27.8	28.5
Temperatura mínima (°C)	22.5	22.7	19.6	16.8	14.8	12.5	9.7	12.8	15.5	20.1	21.3	22.1
Temperatura máxima (°C)	35.1	34.1	30.7	28.1	26.1	24.1	24.6	29	30.9	33.4	34.3	35
Temperatura media (°F)	83.8	83.1	77.2	72.3	68.7	64.9	62.8	69.6	73.8	80.1	82.0	83.3
Temperatura mínima (°F)	72.5	72.9	67.3	62.2	58.6	54.5	49.5	55.0	59.9	68.2	70.3	71.8
Temperatura máxima (°F)	95.2	93.4	87.3	82.6	79.0	75.4	76.3	84.2	87.6	92.1	93.7	95.0
Precipitación (mm)	151	129	162	60	37	15	8	1	2	43	76	103

Fuente: [www.tutiempo.net/clima](http://www.tutiempo.net/clima)

La variación en la precipitación entre los meses más secos y más húmedos es 161 mm a lo largo del año, las temperaturas varían en 11.7 ° C.

### 3.1.1.3 Geología

El paisaje geomorfológico donde se encuentra ubicado Villamontes, corresponde a un conjunto de serranías paralelas sub andinas, con altura y grados de disección muy variables.

Geológicamente corresponden al periodo carbónico y terciario, compuesto por rocas areniscas, conglomerados y limonitas con un cierto grado de fracturamiento afectadas por una fase de plegamiento plioceno.

Este conjunto de serranías encierra una serie de valles, con tamaño y forma variables, sedimentos aluviales y coluviales del cuaternario.

#### **3.1.1.4 Estudio de suelos**

El suelo es el resultado de la acción conjunta del clima y de los organismos vivos sobre la corteza terrestre. Está formado por una mezcla de partículas minerales y orgánicas, que resulta de la desintegración mecánica y de la descomposición química de rocas pre-existentes, la incorporación de materia orgánica por descomposición de tejidos vegetales y animales y la organización de éstos elementos en capas más o menos definidas, forman el perfil del suelo.

Los suelos pueden ser residuales o transportados, según se les encuentre en el mismo lugar en el que se han generado o en lugar diferente.

El transporte por aire o agua y la sedimentación de estos dos medios constituyen el mecanismo usual que da lugar a un suelo transportado.

#### **3.1.1.5 Elementos del alineamiento en el diseño**

##### **3.1.1.5.1 Elementos del alineamiento horizontal**

Número de carriles = 2

Número de sentidos = 1 y 2

Ancho de carril = 4.50 y 5 m

Pendiente transversal = 1.50 y 2 %

##### **3.1.1.5.2 Elementos del alineamiento vertical**

Al igual que el alineamiento horizontal el alineamiento vertical se tomó los parámetros correspondientes para su diseño.

Pendiente longitudinal

Pendiente mínima = 0.50 %

Pendiente máxima = 10 %

Para el diseño del paquete estructural se tienen los valores de los métodos de Westergard y AASTHO.

### 3.1.1.6 Diseño de la estructura

#### 3.1.1.6.1 Método de Westergard

$$S = \frac{3P}{h^2} * \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right]$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{E * h^3}{12 * (1 - \mu^2) * K}}$$

Esfuerzo máximo en la localización respectiva	S = 35.5 Kg/cm <sup>2</sup>
Módulo elástico del concreto	E = 280000 Kg/m <sup>3</sup>
Relación de Poisson del concreto	μ = 0.15
Módulo de reacción del soporte (Para un CBR subrasante 4%)	K = 3.5
Carga por rueda	P = 8.20 toneladas (carga/eje)
Radio del área cargada (para carga /rueda 4100 Kg.)	a = 20 cm

Iterando: h = 18 cm

### 3.1.1.6.2 Método AASTHO

El procedimiento incluido en la Guía AASHTO determina el espesor D de un pavimento de hormigón para que éste pueda soportar el paso de un número W18 de ejes equivalentes de 18 kilolibras (8.20 toneladas) sin que se produzca una disminución en el índice superior a un cierto valor  $\Delta$  PSI. Dicho índice de servicio PSI es un valor que se calcula a partir de una serie de medidas en el pavimento (regularidad superficial, agrietamiento, baches), y que se ha comprobado que tiene una buena correspondencia con la calificación subjetiva que dan al mismo los usuarios

Una vez definidos los valores de distintos parámetros, entrando con los mismos en la ecuación general del método AASHTO se obtiene el espesor de losa necesario.

(El detalle de los valores que se utilizan en la ecuación del método AASHTO, serán desglosados en el anexo A de este trabajo de investigación).

Proyecto pavimento rígido zona urbana de Villamontes

Periodo de diseño 20 años

Modulo K = 51

#### **Rigid Structural Design**

Pavement Type	JPCP
80-kN ESALs Over Initial Performance Period	3,081,612
Initial Serviceability	4.5
Terminal Serviceability	2.5
28-day Mean PCC Modulus of Rupture	4,500 kPa
28-day Mean Elastic Modulus of Slab	26,000,000 kPa
Mean Effective k-value	51 kPa/mm

Reliability Level	80 %
Overall Standard Deviation	0.35
Load Transfer Coefficient, J	3.2
Overall Drainage Coefficient, Cd	1.1
Calculated Design Thickness	180 mm

$e_1 =$  espesor de la losa = 18 cm

Espesor capa sub base

CBR subrasante = 5%

Con ese CBR en el ábaco de CBR

$h =$  pavimento = 41 cm

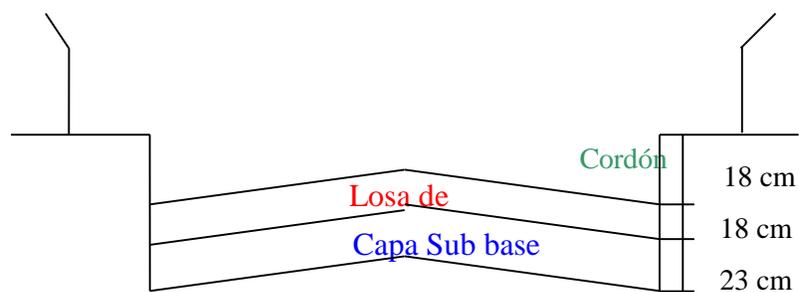
Espesor capa sub base

Espesor de Sub base = 23 cm

Espesor losa = 18 cm

Espesor pavimento = 41 cm

Gráfico 3.1 Sección transversal típica pavimento de hormigón



Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.7 Determinación de esfuerzos en losas de pavimento rígido, mediante el uso del programa de elementos finitos Everfe

Configuración de losas (3X3) que están en una sola capa de base y que se somete a una combinación de carga de eje de rueda y térmica.

Pruebas para distintas dimensiones de losas, las que tendrá una superficie geométrica cuadrada y tendrán una longitud de 120 cm, 150 cm, 180 cm, 220 cm, 250 cm, 300 cm, 350cm y una prueba para una superficie rectangular de 450x350 (losa tradicional) con un espesor constante.

Se analizara la repuesta del pavimento para ejes simple, tándem y tridem; además del efecto térmico de acuerdo a las condiciones de la zona, el cambio de temperatura se supondrá lineal a través del espesor de la losa de arriba a abajo.

#### 3.1.1.7.1 Configuración de losas

Tabla 3.2 Configuración de losas de pavimento rígido para la ciudad de Villamontes

Nº de losa	Forma geométrica	Dimensión de la losa (cm)	Espesor de la losa (cm)	Método constructivo
1	Cuadrada	120x120	18	Losa Corta
2	Cuadrada	150x150	18	Losa Corta
3	Cuadrada	180x180	18	Losa Corta
4	Cuadrada	220x220	18	Losa Corta
5	Cuadrada	250x250	18	Losa Corta
6	Cuadrada	300x300	18	Losa Corta
7	Cuadrada	350x350	18	Losa Corta
8	Rectangular	450x350	18	Losa Tradicional

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.7.2 Resumen de los parámetros de diseño para la ciudad de Villamontes

Tabla 3.3 Parámetros de entrada para el diseño de la ciudad de Villamontes

Parámetros	Nomenclatura	Valores
<b>Propiedades de la losa</b>		
Módulo de elasticidad de la losa (MPa)	$E_C$	26,000
Coefficiente de Poisson	$\mu$	0.15
Coefficiente de expansión térmica	$\alpha$	$1.1 \times 10^{-5}$
Módulo de ruptura (MPa)	MR	4.50
Densidad de la losa ( $\text{Kg/m}^3$ )	$\rho$	2400
Gradiente de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta T$	11.70
<b>Propiedades de la base</b>		
Módulo de elasticidad de la base (MPa)	$E_b$	5000
Espesor de base (m)	$h_b$	0.23
Módulo elástico efectivo de soporte de la sub base (MPa/m)	K	13.60
Coefficiente de Poisson de base	$\nu$	0.20
Coefficiente de expansión térmica	$\alpha$	$1.1 \times 10^{-5}$
<b>Condiciones climáticas</b>		
Velocidad anual del viento (Km/h)	V	6.73

Temperatura promedio (°C)	T	24
Precipitación media (mm)	P	787
<b>Criterios del comportamiento</b>		
Índice de serviciabilidad inicial	$P_1$	4.50
Índice de serviciabilidad final	$P_2$	2.50
Confiabilidad °	R	80%
Desviación estándar del sistema	$S_o$	0.35
<b>Ejes equivalentes</b>		
Transito promedio diario	TPD	1381
Crecimiento anual	r	3.40%
Vida útil	t	20
ESAL de diseño	ESALS	3,081,612
<b>Espesor de la losa (m)</b>	e	0.18

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.8 Aplicación del programa

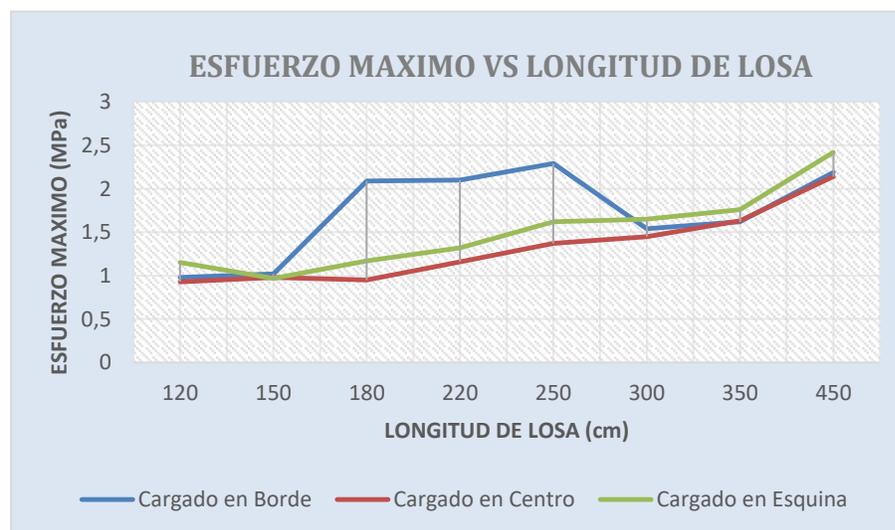
Con las configuraciones definidas y los datos preestablecidos del pavimento rígido, se procede a la aplicación del método de elementos finitos, mediante la simulación de modelos de prueba, con el programa computacional (Everfe), la descripción y el manual de uso de este programa será detallado en el anexo A (metodología 1), de este trabajo de investigación más un ejemplo de su procesamiento de datos.

#### 3.1.1.8.1 Resultados utilizando un eje simple

Tabla 3.4 Esfuerzos máximos absolutos

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.98	0.93	1.15
150	150	1.02	0.98	0.97
180	180	2.09	0.95	1.17
220	220	2.1	1.16	1.32
250	250	2.29	1.37	1.62
300	300	1.54	1.45	1.65
350	350	1.62	1.63	1.76
450	350	2.19	2.14	2.42

Gráfico 3.2 Esfuerzos máximos absolutos



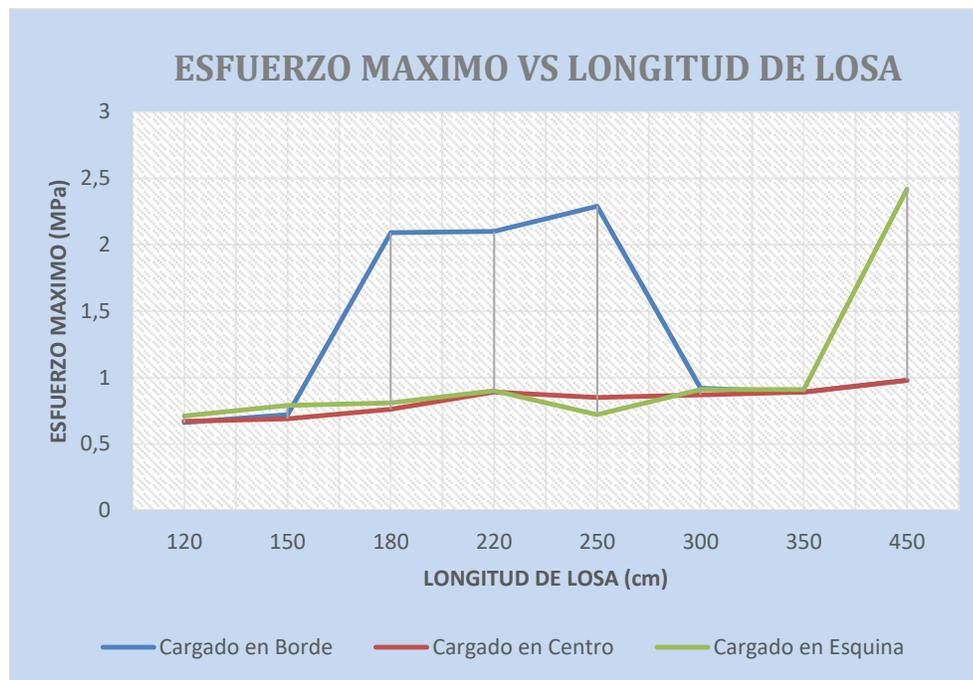
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.98	0.93	1.15
150	150	1.02	0.98	0.97
180	180	2.09	0.95	1.17
220	220	2.1	1.16	1.32
250	250	2.29	1.37	1.62
300	300	1.54	1.45	1.65
350	350	1.62	1.63	1.76
450	350	2.19	2.14	2.42

120	120	0.66	0.67	0.71
150	150	0.72	0.69	0.79
180	180	2.09	0.76	0.81
220	220	2.1	0.89	0.9
250	250	2.29	0.85	0.72
300	300	0.92	0.87	0.91
350	350	0.89	0.89	0.91
450	350	0.98	0.98	2.42

Gráfico 3.2.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

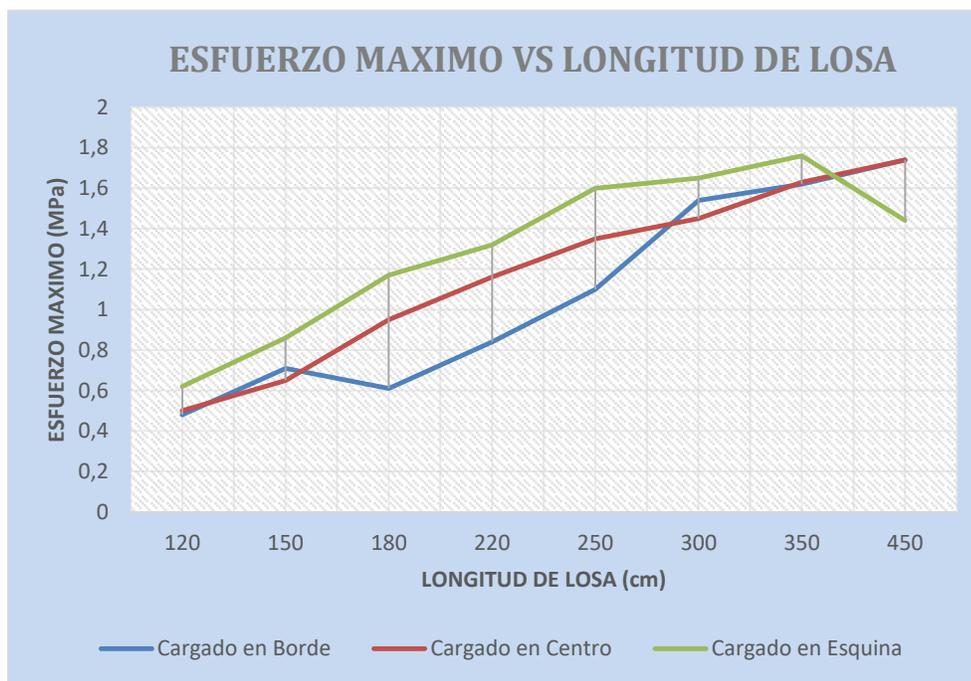


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.48	0.5	0.62
150	150	0.71	0.65	0.86
180	180	0.61	0.95	1.17
220	220	0.84	1.16	1.32
250	250	1.1	1.35	1.6
300	300	1.54	1.45	1.65
350	350	1.62	1.63	1.76
450	350	1.74	1.74	1.44

Gráfico 3.2.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa



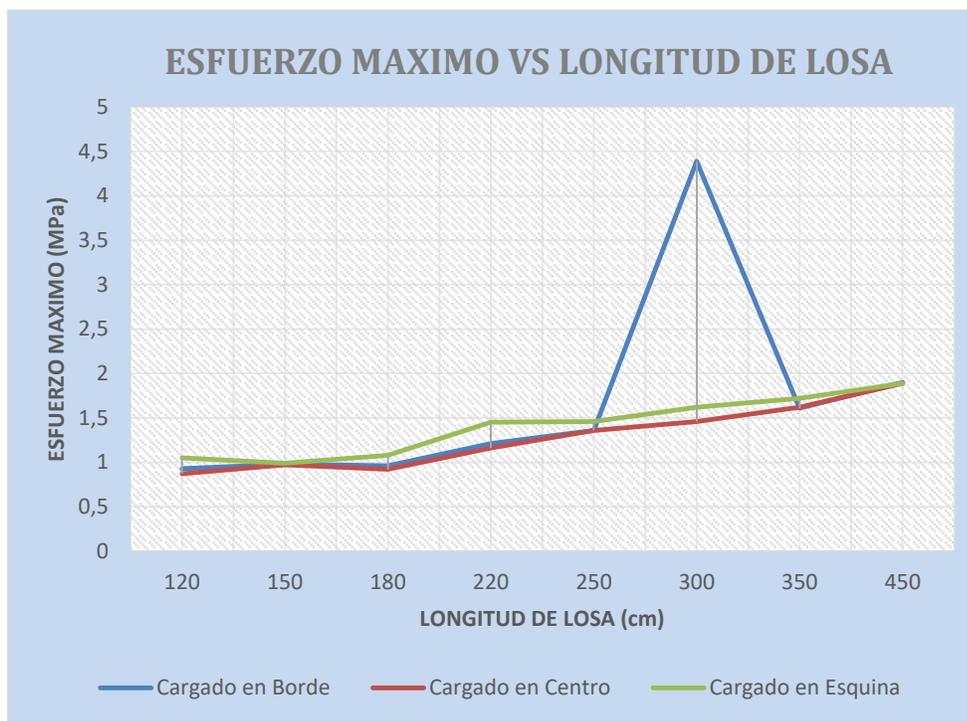
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.8.2 Resultados utilizando un eje tándem

Tabla 3.5 Esfuerzos máximos absolutos

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.93	0.87	1.05
150	150	0.98	0.97	0.99
180	180	0.96	0.92	1.08
220	220	1.21	1.16	1.45
250	250	1.36	1.36	1.46
300	300	4.39	1.46	1.62
350	350	1.61	1.62	1.72
450	350	1.90	1.89	1.89

Gráfico 3.3 Esfuerzos máximos absolutos

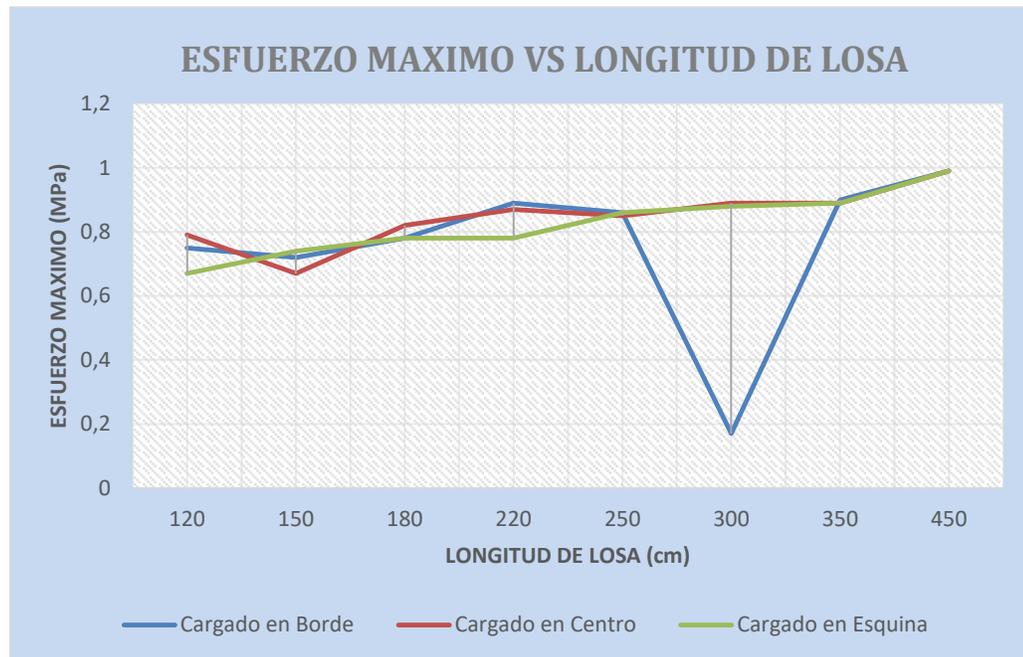


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.75	0.79	0.67
150	150	0.72	0.67	0.74
180	180	0.78	0.82	0.78
220	220	0.89	0.87	0.78
250	250	0.86	0.85	0.86
300	300	0.17	0.89	0.88
350	350	0.9	0.89	0.89
450	350	0.99	0.99	0.99

Gráfico 3.3.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa



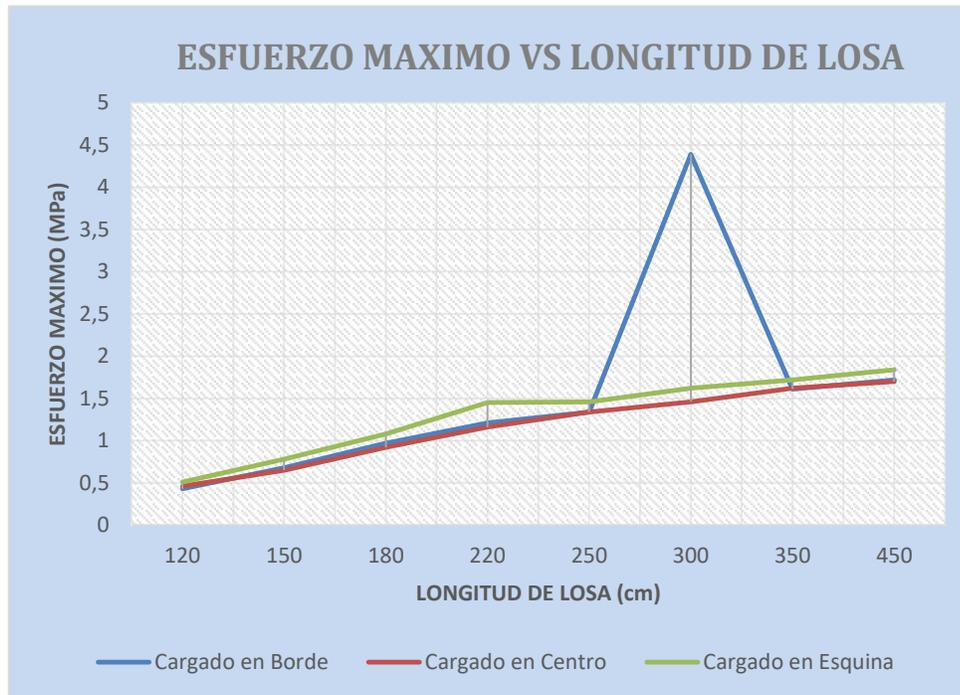
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.43	0.46	0.51
150	150	0.68	0.65	0.78
180	180	0.97	0.92	1.08
220	220	1.21	1.16	1.45
250	250	1.34	1.34	1.46

300	300	4.39	1.46	1.62
350	350	1.61	1.62	1.72
450	350	1.72	1.7	1.84

Gráfico 3.3.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa



Fuente: Elaboración propia

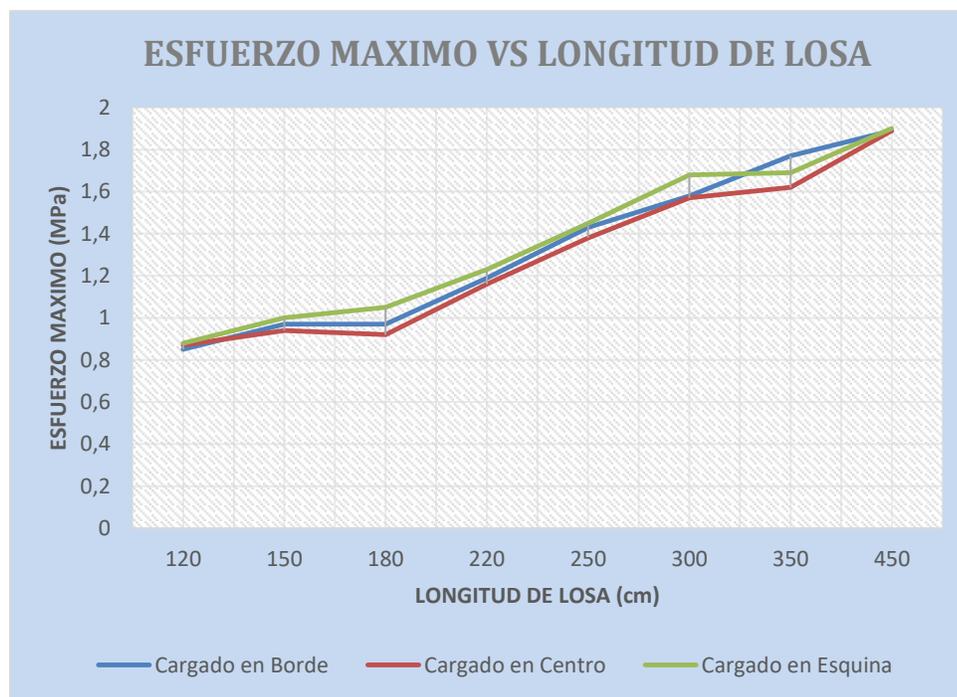
### 3.1.1.8.3 Resultados utilizando un eje tridem

Tabla 3.6 Esfuerzos máximos absolutos

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.85	0.87	0.88

150	150	0.97	0.94	1
180	180	0.97	0.92	1.05
220	220	1.19	1.16	1.23
250	250	1.43	1.38	1.45
300	300	1.58	1.57	1.68
350	350	1.77	1.62	1.69
450	350	1.89	1.89	1.90

Gráfico 3.4 Esfuerzos máximos absolutos



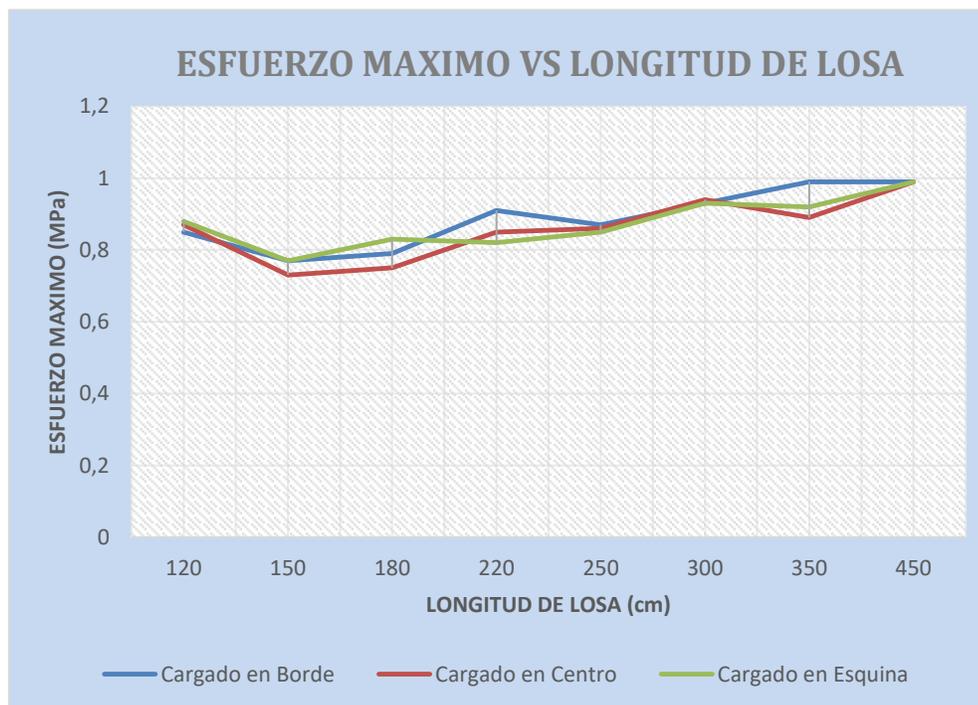
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

		<b>Esfuerzos máximos absolutos (MPa)</b>
--	--	--

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Borde	Centro	Esquina
120	120	0.85	0.87	0.88
150	150	0.77	0.73	0.77
180	180	0.79	0.75	0.83
220	220	0.91	0.85	0.82
250	250	0.87	0.86	0.85
300	300	0.93	0.94	0.93
350	350	0.99	0.89	0.92
450	350	0.99	0.99	0.99

Gráfico 3.4.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

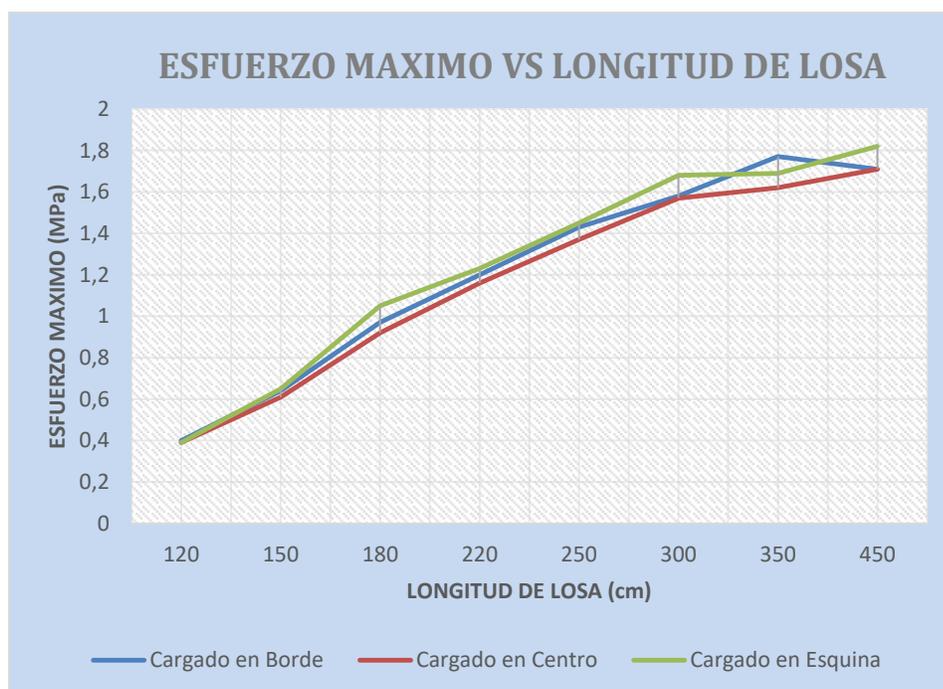


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.4	0.39	0.39
150	150	0.64	0.61	0.65
180	180	0.97	0.92	1.05
220	220	1.2	1.16	1.23
250	250	1.43	1.37	1.45
300	300	1.58	1.57	1.68
350	350	1.77	1.62	1.69
450	350	1.71	1.71	1.82

Gráfico 3.4.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa



Fuente: Elaboración propia

### **3.1.2 Pavimento rígido área urbana de la ciudad de Yacuiba**

#### **3.1.2.1 Ubicación**

La localidad de Yacuiba se encuentra ubicada, en la capital de la primera sección de la provincia Gran Chaco del Departamento de Tarija, distante a 320 Km de la ciudad, al sur de Bolivia y frontera con la Republica Argentina.

#### **3.1.2.2 Delimitación del área de influencia**

El pavimento rígido abarca la zona noroeste de la ciudad de Yacuiba; los barrios San Jerónimo, El Prado y Gremial, entre otros.

#### **3.1.2.3 Resumen climatológico**

El clima es templado y cálido en Yacuiba. En invierno hay en mucho menos lluvia que en verano. La temperatura aquí es en promedio 21.5 ° C. La precipitación es de 1096 mm al año.

Tabla 3.7 Datos históricos del tiempo de la ciudad de Yacuiba

	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media (°C)	25.6	25	23.2	20.8	18.6	15.6	15.8	18.1	21.1	23.6	24.5	25.6
Temperatura mínima (°C)	19.2	19.5	17.8	15.3	13.1	10	8.3	9.7	13.2	17.1	18.1	19.2
Temperatura máxima (°C)	32	30.6	28.7	26.3	24.1	21.2	23.4	26.6	29	30.2	31	32.1
Temperatura media (°F)	78.1	77.0	73.8	69.4	65.5	60.1	60.4	64.6	70.0	74.5	76.1	78.1
Temperatura mínima (°F)	66.6	67.1	64.0	59.5	55.6	50.0	46.9	49.5	55.8	62.8	64.6	66.6
Temperatura máxima (°F)	89.6	87.1	83.7	79.3	75.4	70.2	74.1	79.9	84.2	86.4	87.8	89.8

Precipitación (mm)	196	173	188	137	34	23	9	8	9	51	102	166
--------------------	-----	-----	-----	-----	----	----	---	---	---	----	-----	-----

Fuente: [www.tutiempo.net/clima](http://www.tutiempo.net/clima)

Con un promedio de 25.6 ° C, enero es el mes más cálido. El mes más frío del año es de 15.6 °C en el medio de junio.

### 3.1.2.4 Estudio de suelos

Generalmente hasta una profundidad de 1 m. se encuentran arcillas entre baja y mediana compresibilidad “CL” y arenas mal graduadas “SP”.

### 3.1.2.5 Diseño de la estructura

#### 3.1.2.5.1 Método de Westergard

$$S = \frac{3P}{h^2} * \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right]$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{E * h^3}{12 * (1 - \mu^2) * K}}$$

Esfuerzo máximo en la localización respectiva       $S = 35.50 \text{ Kg/cm}^2$

Módulo elástico del concreto       $E = 20594 \text{ Kg/m}^3$

Relación de Poisson del concreto       $\mu = 0.20$

Módulo de reacción del soporte       $K = 4$

(Para un CBR subrasante 9%)

carga por rueda       $P = 8.20 \text{ toneladas (carga/eje)}$

Radio del área cargada       $a = 20 \text{ cm}$

(Para carga /rueda 4100 Kg.)

Iterando:     $h = 24 \text{ cm}$

### 3.1.2.5.2 Método AASTHO

Los datos de diseño son los correspondientes al pavimento rígido de la avenida San Jerónimo de la ciudad de Yacuiba.

Periodo de diseño t	20 años
Índice de crecimiento vegetativo	5%
TMDA 2004	421
Índice de crecimiento atraído	3%
CBR subrasante	9%
Confiabilidad R	90%
Módulo de rotura Sc	39 kg/cm <sup>2</sup> =555 psi
ESALS	9.67 E +06
Desviación estándar So	0.35
Coeficiente de drenaje Cd	1
Coeficiente de transferencia de carga J	2.50
Serviciabilidad inicial Po	4.50
Serviciabilidad final Pt	2.
Módulo de reacción de la subrasante K	4 kg/cm <sup>3</sup>
Módulo elástico del hormigón	2.1 E+05 kg/cm <sup>2</sup> = 3.5 E+06psi
Perdida de serviciabilidad Po-Pt=4.50-2	2.50

$W_{18} = 5 \cdot 10^6$  Para un vehículo tipo 8.20 toneladas para 25 años de vida útil y un

TPD = 50 veh/día.

R = 95%

$S_o = 0.35$

MR = 1500 \* 4 = 6000 psi.

$\Delta PSI = 1.90$

Resolviendo en el ábaco: SN = 5

En la Ecuación general

$$SN = a_1 e_1 + a_2 e_2 m_1$$

$e_1 =$  espesor de la losa=24 cm

Espesor capa sub base:

CBR subrasante = 9%

Con ese CBR en el ábaco de CBR:

H = pavimento = 39 cm.

Espesor capa sub base =  $39 - 24 = 15$  cm

Espesor sub base = 15 cm

Espesor de losa = 24 cm

Espesor de sub base = 15 cm

Espesor total = 39cm

### 3.1.2.6 Determinación de esfuerzos en losas de pavimento rígido

Configuración de losas (3X3) que están en una sola capa de base y que se somete a una combinación de carga de eje de rueda y térmica.

Pruebas para distintas dimensiones de losas, las que tendrá una superficie geométrica cuadrada y tendrán una longitud de 120 cm, 150 cm, 180 cm, 220 cm, 250 cm, 300 cm, 350cm y 375cm; con un espesor constante.

Se analizara la repuesta del pavimento para ejes simple, tándem y tridem; además del efecto térmico de acuerdo a las condiciones de la zona, el cambio de temperatura se supondrá lineal a través del espesor de la losa de arriba a abajo.

#### 3.1.2.6.1 Configuración de losas

Tabla 3.8 Configuración de losas pavimento rígido Yacuiba

N° de losa	Forma geométrica	Dimensión de la losa (cm)	Espesor de la losa (cm)	Método constructivo
1	Cuadrada	120x120	24	Losa Corta
2	Cuadrada	150x150	24	Losa Corta
3	Cuadrada	180x180	24	Losa Corta

4	Cuadrada	220x220	24	Losa Corta
5	Cuadrada	250x250	24	Losa Corta
6	Cuadrada	300x300	24	Losa Corta
7	Cuadrada	350x350	24	Losa Corta
8	Rectangular	375x375	24	Losa Tradicional

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2.6.2 Resumen de los parámetros de diseño para la ciudad de Yacuiba

Tabla 3.9 Parámetros de entrada para el diseño de la ciudad de Yacuiba

Parámetros	Nomenclatura	Valores
<b>Propiedades de la losa</b>		
Módulo de elasticidad de la losa (MPa)	$E_C$	20594
Coefficiente de Poisson	$\mu$	0.20
Coefficiente de expansión térmica	$\alpha$	$1.1 \times 10^{-5}$
Módulo de ruptura (MPa)	MR	4
Espaciamiento de juntas (m)	L	1.80
Densidad de la losa (Kg/m <sup>3</sup> )	$e$	2400
Gradiente de temperatura (°C)	$\Delta T$	10
<b>Propiedades de la base</b>		
Módulo de elasticidad de la base (MPa)	$E_b$	5000
Espesor de base (m)	$h_b$	0.15

Módulo elástico efectivo de soporte de la sub base (MPa/m)	K	13.60
Coefficiente de Poisson de base	$\nu$	0.2
Coefficiente de expansión térmica	$\alpha$	1.1X10-5
<b>Condiciones climáticas</b>		
Velocidad anual del viento (Km/h)	V	8.78
Temperatura anual (°C)	T	21.50
Precipitación anual (mm)	P	1096
<b>Criterios del comportamiento</b>		
Índice de serviciabilidad inicial	$P_1$	4.50
Índice de serviciabilidad final	$P_2$	2
Confiabilidad °	R	90%
Desviación estándar del sistema	$S_o$	0.35
<b>Ejes equivalentes</b>		
Transito promedio diario	TPD	421
Crecimiento anual	r	8%
Vida útil	t	20
ESAL de diseño	ESALS	9665031.26
<b>Espesor de la losa (m)</b>	e	0.24

Fuente: Elaboración propia

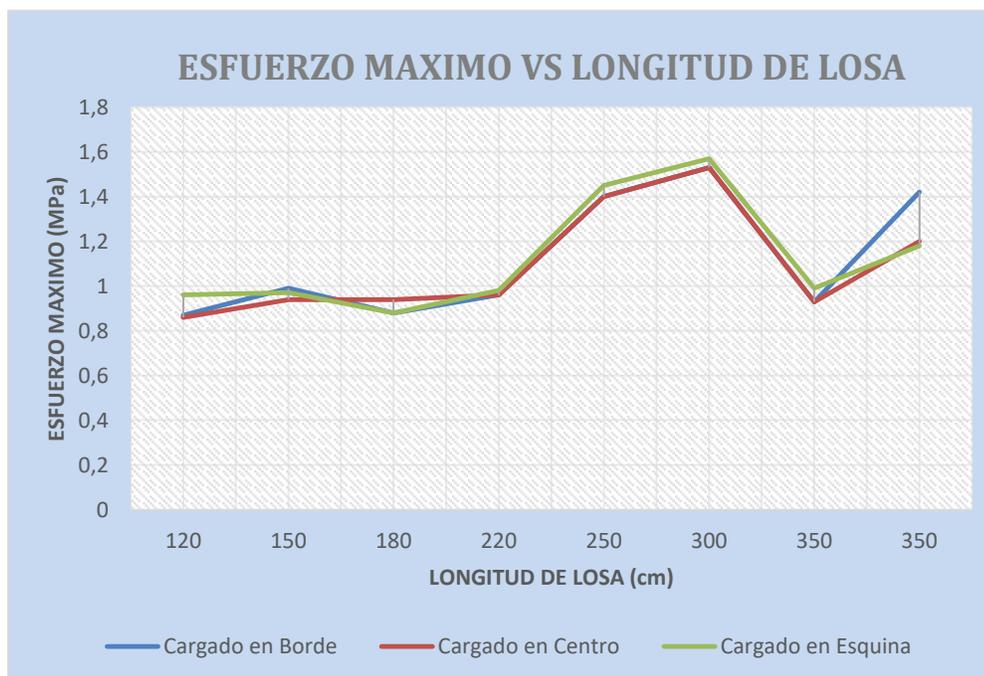
### 3.1.2.7 Aplicación del programa

#### 3.1.2.7.1 Resultados utilizando un eje simple

Tabla 3.10 Esfuerzos máximos absolutos

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.87	0.86	0.96
150	150	0.99	0.94	0.97
180	180	0.88	0.94	0.88
220	220	0.96	0.96	0.98
250	250	1.40	1.40	1.45
300	300	1.53	1.53	1.57
350	350	0.93	0.93	0.99
350	350	1.42	1.20	1.18

Gráfico 3.5 Esfuerzos máximos absolutos

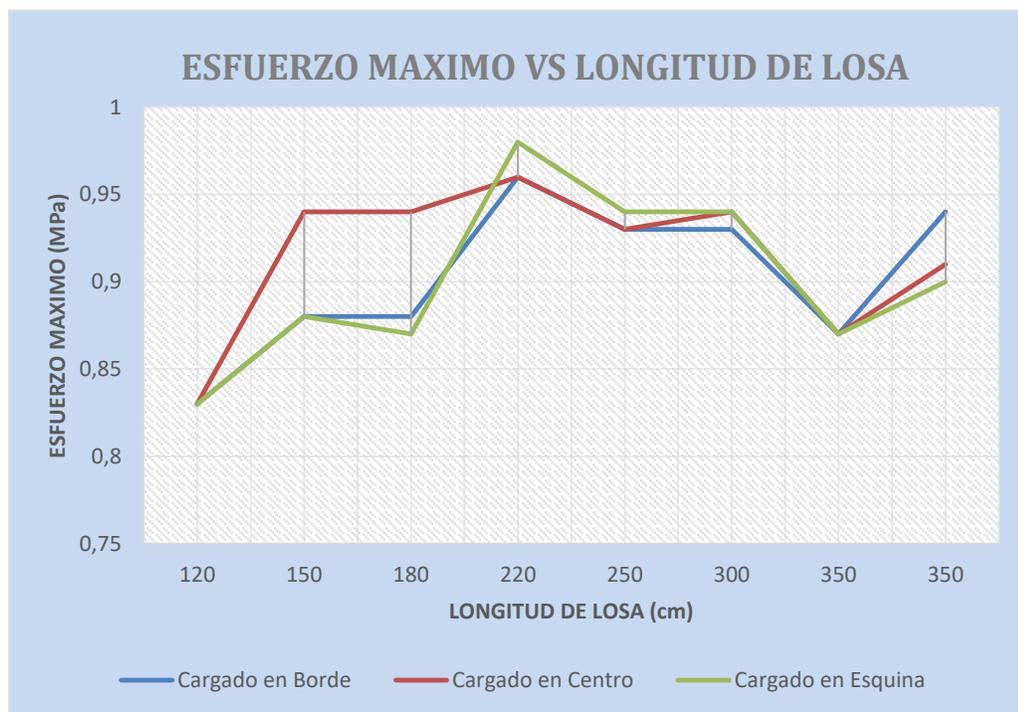


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.83	0.83	0.83
150	150	0.88	0.94	0.88
180	180	0.88	0.94	0.87
220	220	0.96	0.96	0.98
250	250	0.93	0.93	0.94
300	300	0.93	0.94	0.94
350	350	0.87	0.87	0.87
350	350	0.94	0.91	0.90

Gráfico 3.5.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

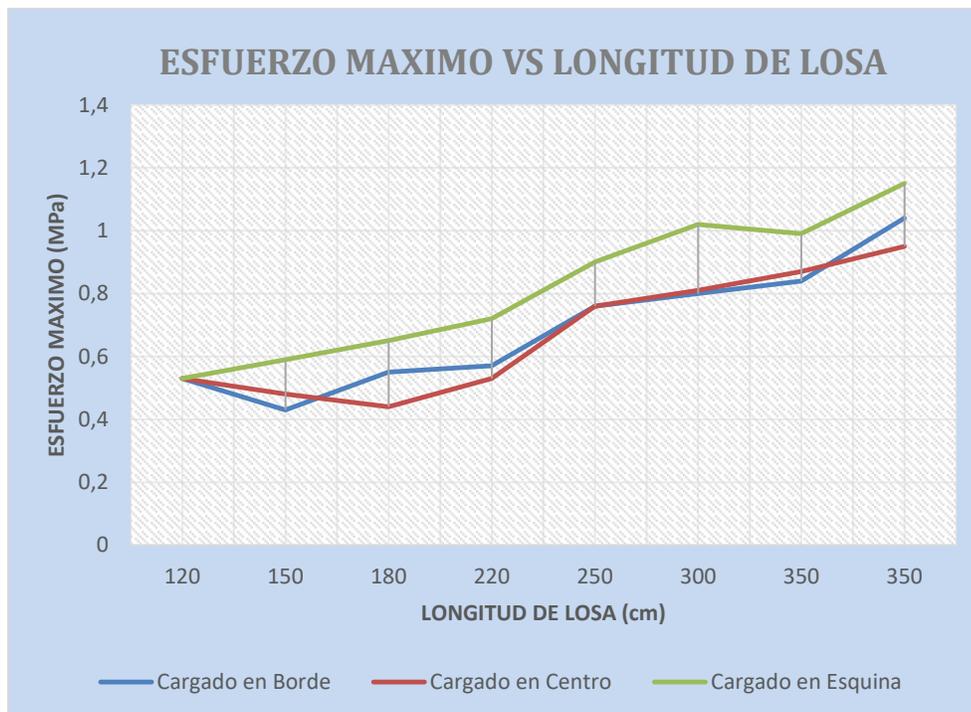


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.53	0.53	0.53
150	150	0.43	0.48	0.59
180	180	0.55	0.44	0.65
220	220	0.57	0.53	0.72
250	250	0.76	0.76	0.90
300	300	0.80	0.81	1.02
350	350	0.84	0.87	0.99
350	350	1.04	0.95	1.15

Gráfico 3.5.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa



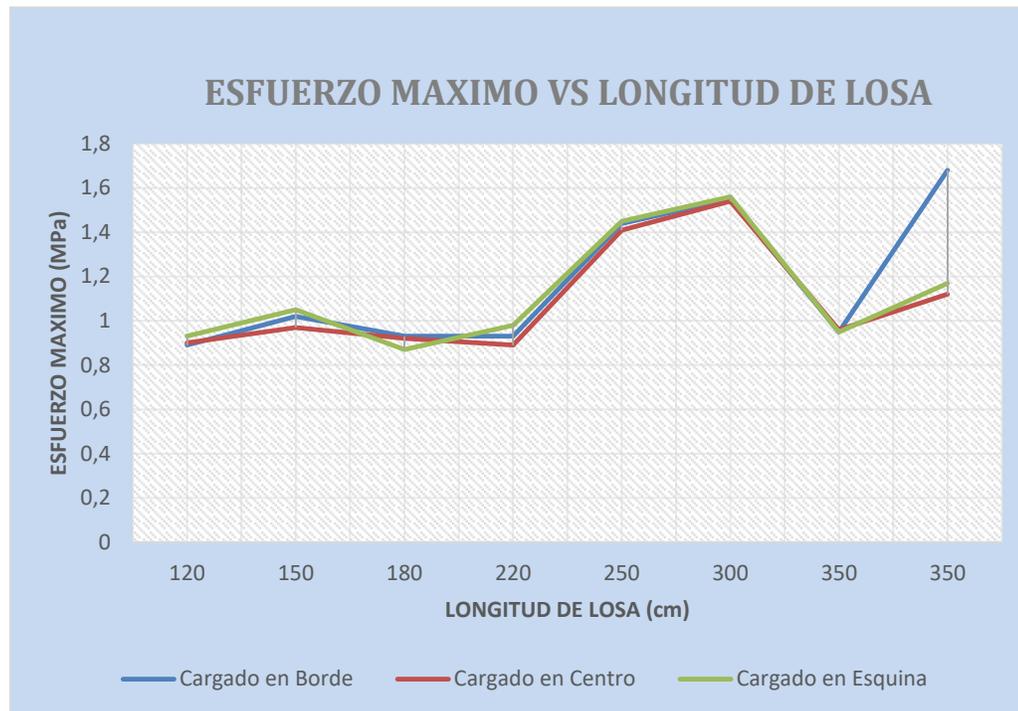
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2.7.2 Resultados utilizando un eje tándem

Tabla 3.11 Esfuerzos máximos absolutos

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.89	0.90	0.93
150	150	1.02	0.97	1.05
180	180	0.93	0.92	0.87
220	220	0.93	0.89	0.98
250	250	1.44	1.41	1.45
300	300	1.55	1.54	1.56
350	350	0.95	0.96	0.95
350	350	1.68	1.12	1.17

Gráfico 3.6 Esfuerzos máximos absolutos

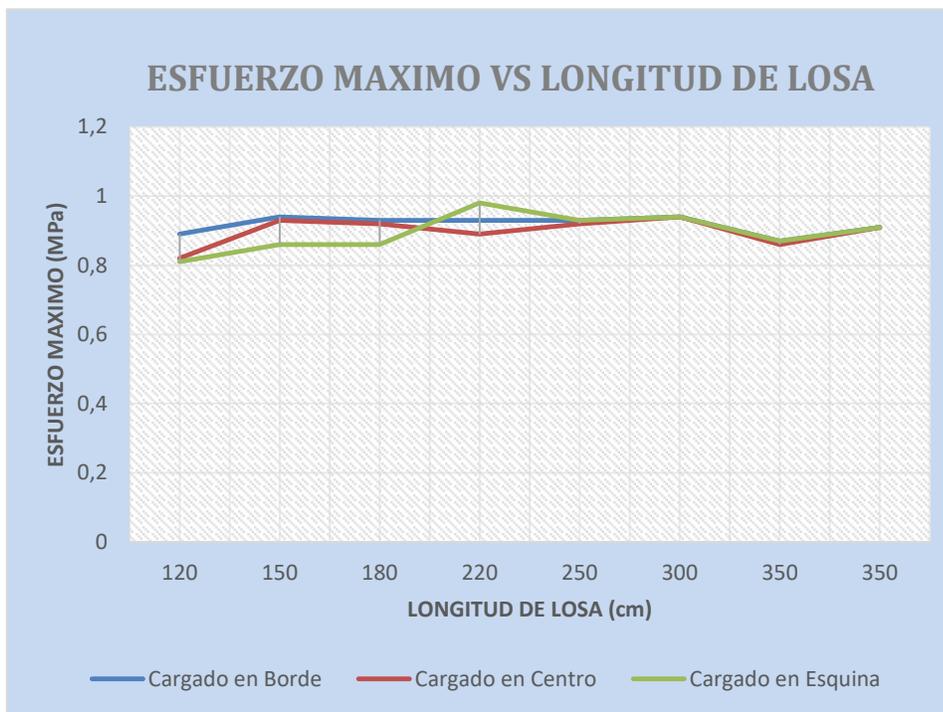


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.89	0.82	0.81
150	150	0.94	0.93	0.86
180	180	0.93	0.92	0.86
220	220	0.93	0.89	0.98
250	250	0.93	0.92	0.93
300	300	0.94	0.94	0.94
350	350	0.87	0.86	0.87
350	350	0.91	0.91	0.91

Gráfico 3.6.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa



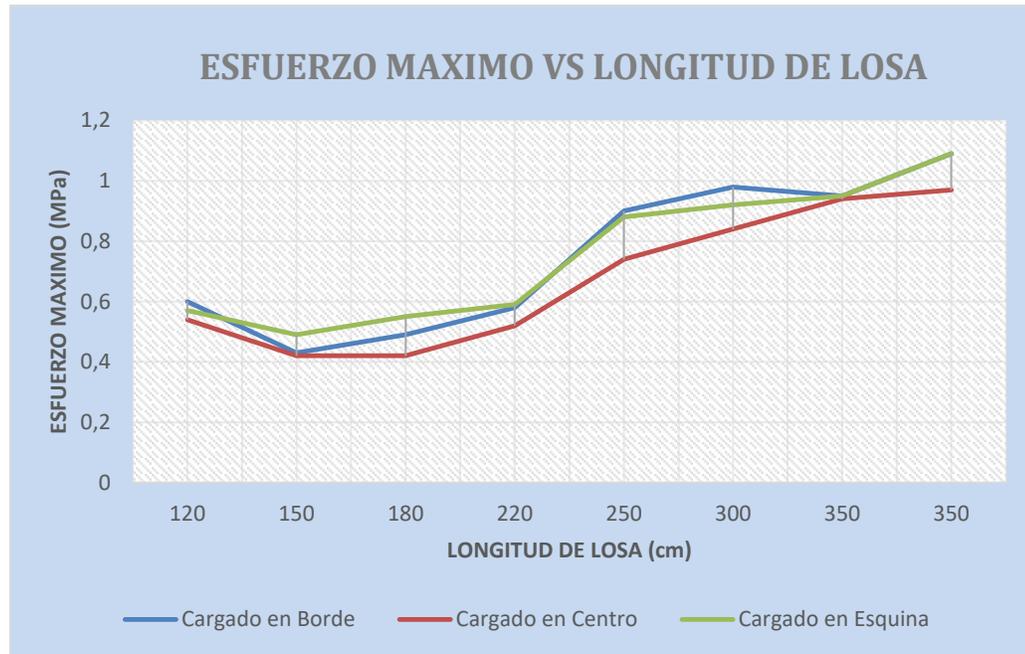
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.6	0.54	0.57
150	150	0.43	0.42	0.49
180	180	0.49	0.42	0.55
220	220	0.58	0.52	0.59
250	250	0.9	0.74	0.88
300	300	0.98	0.84	0.92
350	350	0.95	0.94	0.95

350	350	1.09	0.97	1.09
-----	-----	------	------	------

Gráfico 3.6.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa



Fuente: Elaboración propia

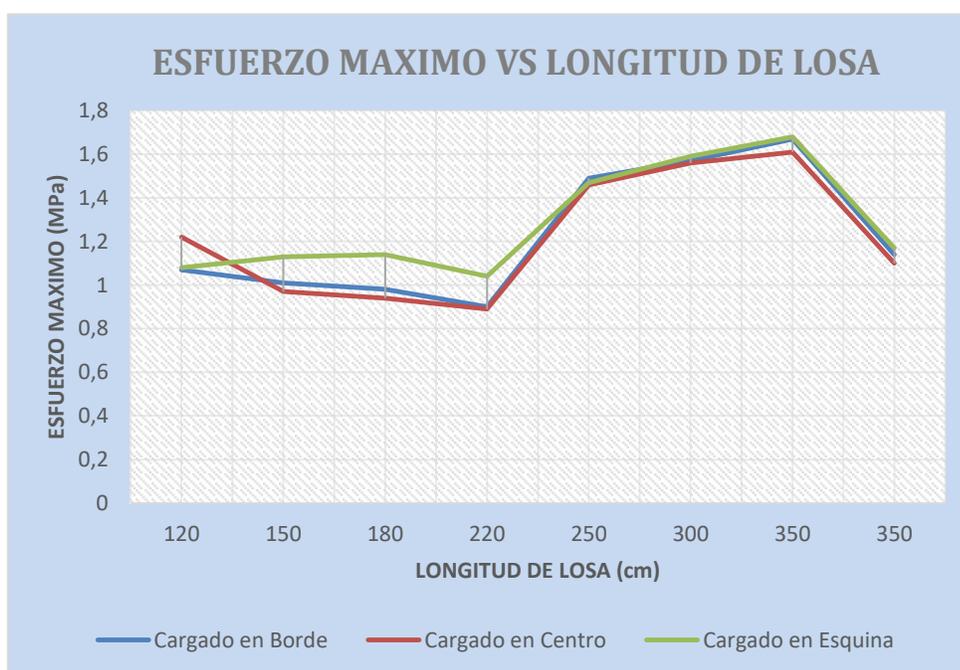
### 3.1.2.7.3 Resultados utilizando un eje tridem

Tabla 3.12 Esfuerzos máximos absolutos

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	1.07	1.22	1.08
150	150	1.01	0.97	1.13
180	180	0.98	0.94	1.14

220	220	0.90	0.89	1.04
250	250	1.49	1.46	1.47
300	300	1.57	1.56	1.59
350	350	1.67	1.61	1.68
350	350	1.14	1.10	1.17

Gráfico 3.7 Esfuerzos máximos absolutos



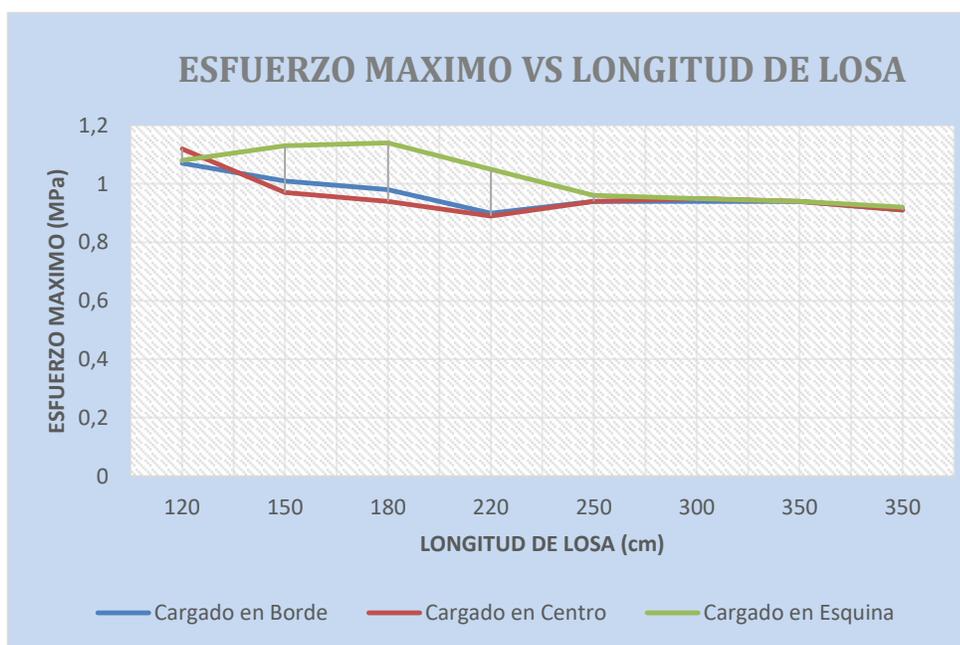
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	1.07	1.12	1.08

150	150	1.01	0.97	1.13
180	180	0.98	0.94	1.14
220	220	0.90	0.89	1.05
250	250	0.94	0.94	0.96
300	300	0.94	0.95	0.95
350	350	0.94	0.94	0.94
350	350	0.91	0.91	0.92

Gráfico 3.7.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

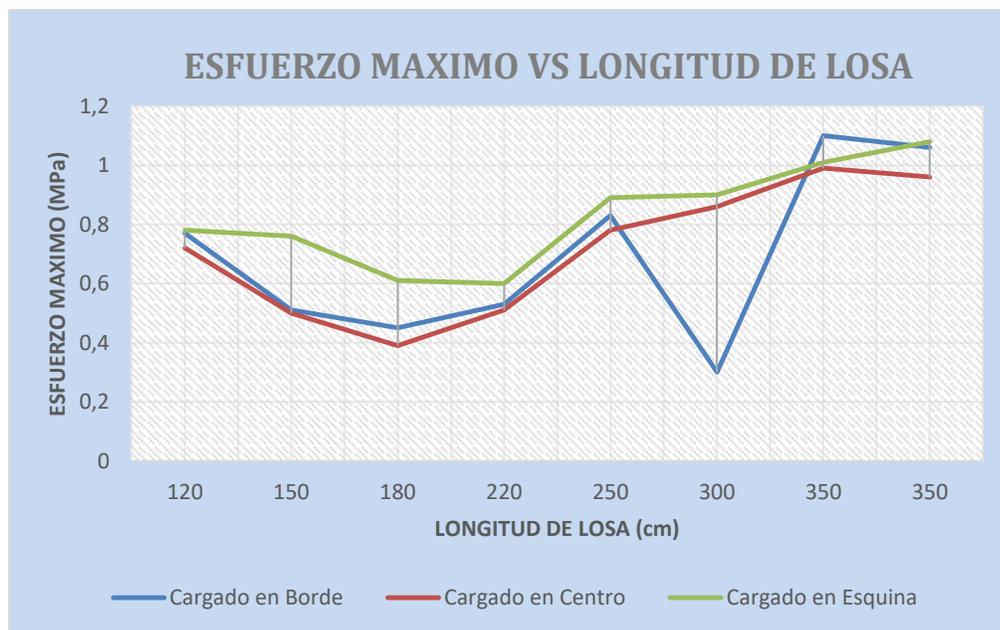


Fuente: Elaboración propia

Tabla 13.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.77	0.72	0.78
150	150	0.51	0.50	0.76
180	180	0.45	0.39	0.61
220	220	0.53	0.51	0.60
250	250	0.83	0.78	0.89
300	300	0.30	0.86	0.9
350	350	1.10	0.99	1.01
350	350	1.06	0.96	1.08

Gráfico 3.7.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa losa



Fuente: Elaboración propia

### **3.1.3 Pavimento rígido de la población de Entre Ríos**

#### **3.1.3.1 Ubicación**

El proyecto se ubica en la localidad de Entre Ríos provincia O' Connor del departamento de Tarija, a 107 Km de la ciudad de Tarija.

El pavimento rígido abarca gran parte del trazo urbano de la población de Entre Ríos, las zonas comprendidas en las regiones de la provincia O'Connor representan, un punto obligado en el tránsito vehicular ya que permiten el intercambio con las zonas norte y sur del departamento de Tarija. Geográficamente Entre Ríos se encuentra entre los paralelos 21°32'30" de latitud sud y 64° 11' 05" de longitud oeste y a una altura sobre el nivel del mar de 1230 mts.

#### **3.1.3.2 Delimitación del área de influencia**

El área que comprende el pavimento rígido está delimitada por las siguientes calles:

Desde la calle E. Avaroa hasta la calle San Juan de Dios de norte a sur, desde la calle Pilcomayo hasta la calle 1° de Mayo de este a oeste.

#### **3.1.3.3 Resumen climatológico**

El clima de Entre Ríos se clasifica como cálido y templado. En comparación con el invierno, los veranos tienen mucha más lluvia. La temperatura aquí es en promedio 19.9 ° C. Precipitaciones aquí promedios 832 mm.

Las temperaturas son más altas en promedio en enero, alrededor de 23.9 ° C. a 14.1 ° C en promedio, julio es el mes más frío del año.

Tabla 3.13 Datos históricos del tiempo de la población de Entre Ríos

	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media (°C)	23.9	23.7	22	19.2	17.5	14.3	14.1	16.6	19.7	21.8	21.9	23.7
Temperatura mínima (°C)	17.5	17.8	16.1	12.9	10.6	7.1	5.3	7.5	11.1	14.6	15.1	16.9
Temperatura máxima (°C)	30.4	29.6	28	25.6	24.5	21.6	23	25.8	28.3	29.1	28.8	30.6
Temperatura media (°F)	75.0	74.7	71.6	66.6	63.5	57.7	57.4	61.9	67.5	71.2	71.4	74.7
Temperatura mínima (°F)	63.5	64.0	61.0	55.2	51.1	44.8	41.5	45.5	52.0	58.3	59.2	62.4
Temperatura máxima (°F)	86.7	85.3	82.4	78.1	76.1	70.9	73.4	78.4	82.9	84.4	83.8	87.1
Precipitación (mm)	145	165	137	71	20	19	5	2	4	45	76	143

Fuente: [www.tutiempo.net/clima](http://www.tutiempo.net/clima)

La variación en la precipitación entre los meses más secos y más húmedos es 163 mm. La variación en la temperatura anual está alrededor de 9.80 ° C.

### 3.1.3.4 Diseño de la estructura

#### 3.1.3.4.1 Método de Westergard

$$S = \frac{3P}{h^2} * \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right]$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{E * h^3}{12 * (1 - \mu^2) * K}}$$

Esfuerzo máximo en la localización respectiva  $S = 35.50 \text{ Kg/cm}^2$

Módulo elástico del concreto  $E = 280000 \text{ Kg/m}^3$

Relación de Poisson del concreto  $\mu = 0.15$

Módulo de reacción del soporte  $K = 3.50$

(Para un CBR subrasante 4%)

Carga por rueda	P = 8.20 toneladas (carga/eje)
Radio del área cargada (para carga /rueda 4100 Kg)	a = 20 cm

Iterando: h = 15 cm

### 3.1.3.4.2 Método AASTHO

Los datos de diseño son los correspondientes al pavimento rígido de la población de Entre Ríos.

Periodo de diseño t	25 años
Índice de crecimiento vegetativo	3.40%
TMDA 2004	1381
CBR Subrasante	4%
Confiabilidad R	80%
Módulo de rotura Sc	6000 psi
ESALS	3081612
Desviación estandar So	0.35
Coeficiente de drenaje Cd	1
Coeficiente de transferencia de carga J	2.50
Serviciabilidad inicial Po	4.50
Serviciabilidad final Pt	2.50
Módulo de reacción de la subrasante K	13.60 MPa/m
Módulo elástico del hormigón	26000 MPa
Perdida de serviciabilidad Po-Pt=4.50-2.00	2

$W_{18} = 5 \cdot 10^6$  Para un vehículo tipo 8.20 toneladas

para 25 años de vida útil

TPD = 50 veh/día

R = 95%

$S_o = 0.35$

MR = 1500 \* 4 = 6000 psi.

$\Delta PSI = 1.90$

Resolviendo en el ábaco: SN = 5

En la Ecuación general

$$SN = a_1 e_1 + a_2 e_2 m_1$$

$$5 = 0.34 e_1 + 0.14 * (0.23) * (1.15)$$

$$e_1 = \text{espesor de la losa} = 15 \text{ cm}$$

Espesor capa sub base:

$$\text{CBR subrasante} = 4\%$$

Con ese CBR en el ábaco de CBR:

$$H = \text{pavimento} = 38 \text{ cm}$$

$$\text{Espesor capa sub base} = 38 - 15 = 23 \text{ cm}$$

$$\text{Espesor sub base} = 23 \text{ cm}$$

### 3.1.3.5 Determinación de esfuerzos en losas de pavimento rígido

Configuración de losas (3X3) que están en una sola capa de base y que se somete a una combinación de carga de eje de rueda y térmica.

Pruebas para distintas dimensiones de losas, las que tendrá una superficie geométrica cuadrada y tendrán una longitud de 120 cm, 150 cm, 180 cm, 220 cm, 250 cm, 300 cm, 350cm y una prueba para una superficie rectangular de 450x350 (losa tradicional) con un espesor constante.

Se analizará la repuesta del pavimento para ejes simple, tándem y tridem; además del efecto térmico de acuerdo a las condiciones de la zona, el cambio de temperatura se supondrá lineal a través del espesor de la losa de arriba a abajo.

#### 3.1.3.5.1 Configuración de losas

Tabla 3.14 Configuración de losas pavimento rígido Entre Ríos

Nº de losa	Forma geométrica	Dimensión de la losa (cm)	Espesor de la losa (cm)	Método constructivo
1	Cuadrada	120x120	15	Losa Corta
2	Cuadrada	150x150	15	Losa Corta

3	Cuadrada	180x180	15	Losa Corta
4	Cuadrada	220x220	15	Losa Corta
5	Cuadrada	250x250	15	Losa Corta
6	Cuadrada	300x300	15	Losa Corta
7	Cuadrada	350x350	15	Losa Corta
8	Rectangular	450x350	15	Losa Tradicional

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3.5.2 Resumen de los parámetros de diseño para la población de Entre Ríos

Tabla 3.15 Parámetros de entrada para el diseño de la población de Entre Ríos

Parámetros	Nomenclatura	Valores
<b>Propiedades de la losa</b>		
Módulo de elasticidad de la losa (MPa)	$E_C$	26000
Coefficiente de Poisson	$\mu$	0.20
Coefficiente de expansión térmica	$\alpha$	1.1X10-5
Módulo de ruptura (MPa)	MR	4.40
Espaciamiento de juntas (m)	L	1.80
Densidad de la losa (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	2400
Gradiente de temperatura (°C)	$\Delta T$	9.80
<b>Propiedades de la base</b>		
Módulo de elasticidad de la base (MPa)	$E_b$	5000
Espesor de base (m)	$h_b$	0.23
Módulo elástico efectivo de soporte de la sub base (MPa/m)	K	13.60
Coefficiente de Poisson de base	$\nu$	0.20

Coefficiente de expansión térmica	$\alpha$	1.1X10-5
<b>Condiciones climáticas</b>		
Velocidad anual del viento (Km/h)	V	9.20
Temperatura anual (°C)	T	19.90
Precipitación anual (mm)	P	832
<b>Criterios del comportamiento</b>		
Índice de serviciabilidad inicial	$P_1$	4.50
Índice de serviciabilidad final	$P_2$	2.50
Confiabilidad °	R	80%
Desviación estándar del sistema	$S_o$	0.35
Iri inicial (m/Km)		2
<b>Ejes equivalentes</b>		
Transito promedio diario	TPD	1381
Crecimiento anual	r	3.40%
Vida útil	t	20
ESAL de diseño	ESALS	3081612
<b>Espesor de la losa (m)</b>	e	0.15

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3.6 Aplicación del programa

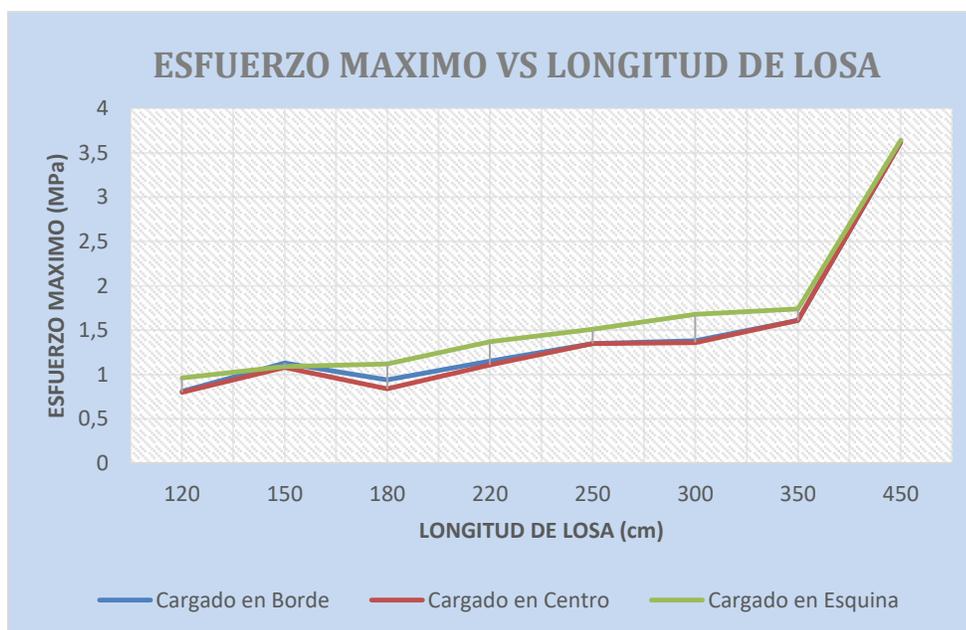
#### 3.1.3.6.1 Resultados utilizando un eje simple

Tabla 3.16 Esfuerzos máximos absolutos

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina

120	120	0.81	0.80	0.96
150	150	1.13	1.08	1.09
180	180	0.94	0.84	1.12
220	220	1.15	1.11	1.37
250	250	1.35	1.35	1.51
300	300	1.38	1.36	1.68
350	350	1.61	1.61	1.74
450	350	3.62	3.62	3.64

Gráfico 3.8 Esfuerzos máximos absolutos

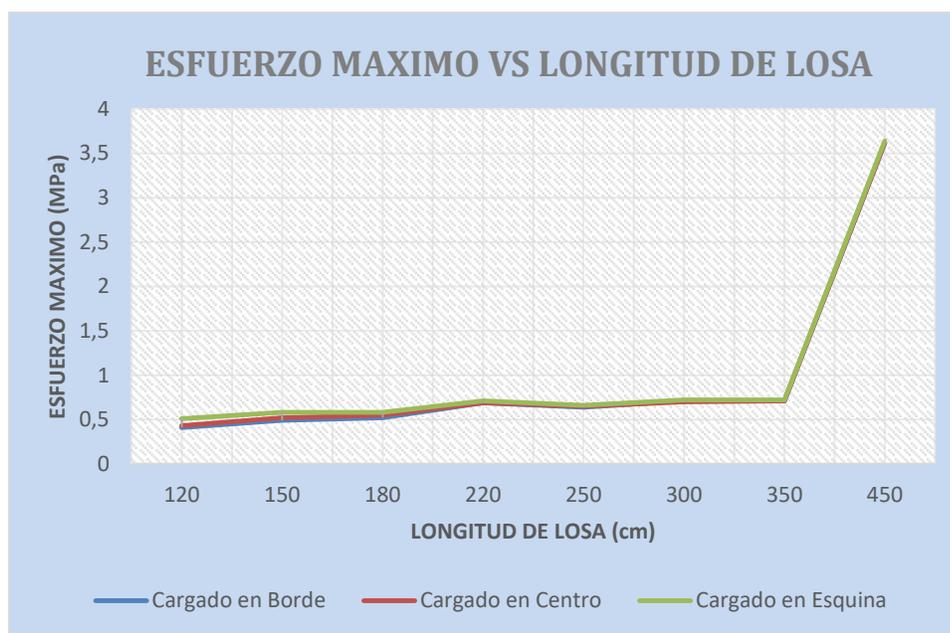


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.41	0.43	0.51
150	150	0.49	0.52	0.58
180	180	0.52	0.55	0.58
220	220	0.69	0.69	0.71
250	250	0.64	0.65	0.66
300	300	0.71	0.70	0.72
350	350	0.71	0.71	0.72
450	350	3.62	3.62	3.64

Gráfico 3.8.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

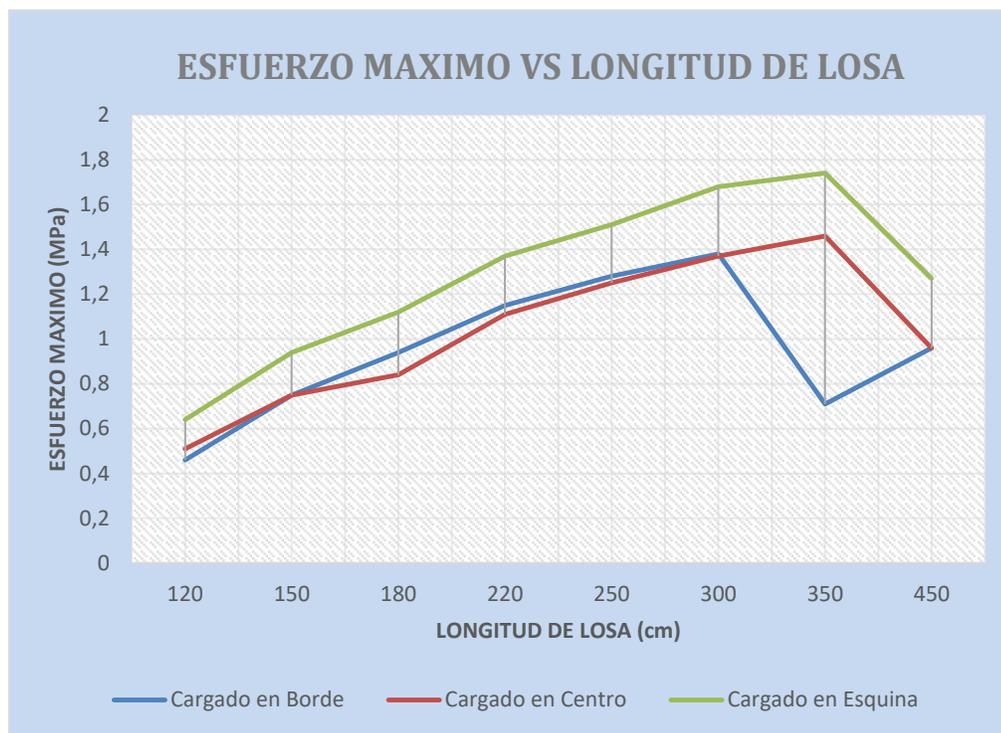


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.46	0.51	0.64
150	150	0.75	0.75	0.94
180	180	0.94	0.84	1.12
220	220	1.15	1.11	1.37
250	250	1.28	1.25	1.51
300	300	1.38	1.37	1.68
350	350	0.71	1.46	1.74
450	350	0.96	0.96	1.27

Gráfico 3.8.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa



Fuente: Elaboración propia

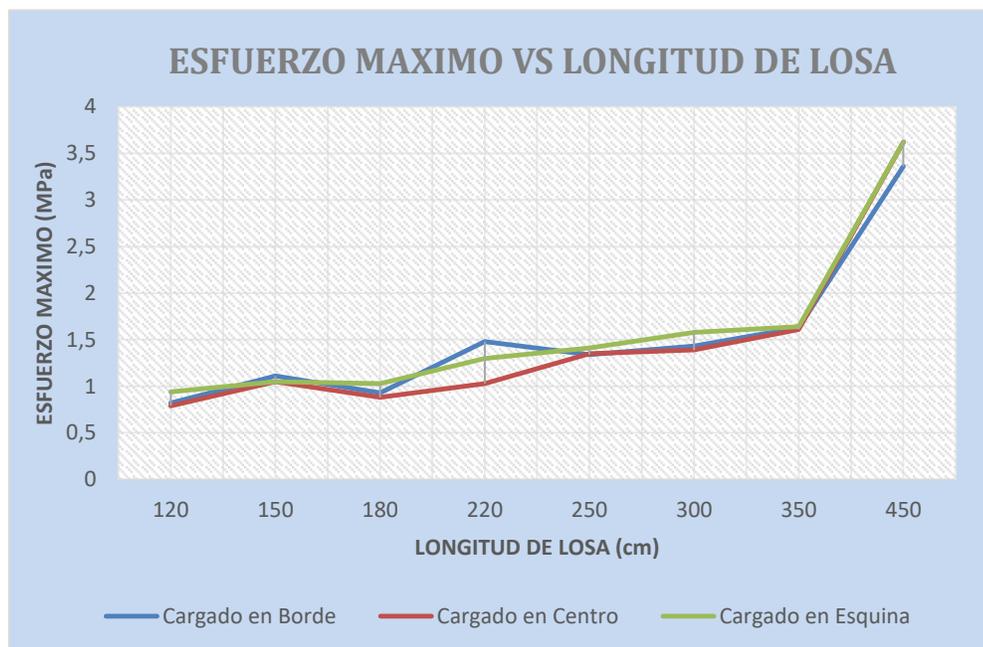
### 3.1.3.6.2 Resultados utilizando un eje tándem

Tabla 3.17 Esfuerzos máximos absolutos

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.82	0.79	0.94
150	150	1.11	1.05	1.05
180	180	0.93	0.88	1.03
220	220	1.48	1.03	1.30
250	250	1.34	1.35	1.41

300	300	1.43	1.39	1.58
350	350	1.63	1.61	1.64
450	350	3.36	3.62	3.62

Gráfico 3.9 Esfuerzos máximos absolutos



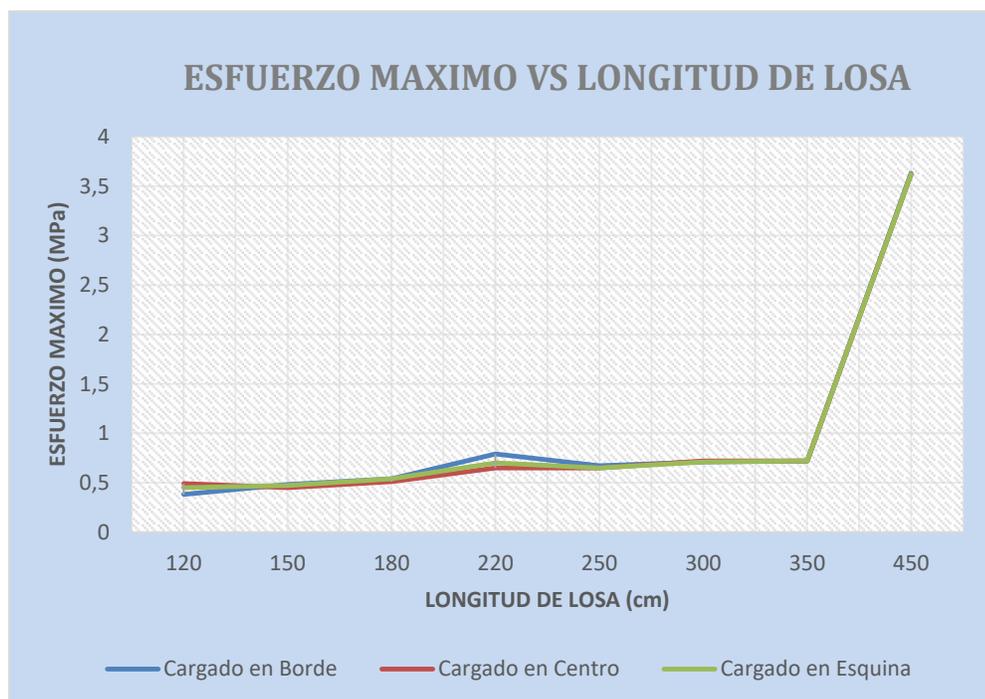
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.38	0.49	0.45
150	150	0.48	0.45	0.47
180	180	0.54	0.51	0.54
220	220	0.79	0.65	0.70

250	250	0.67	0.65	0.65
300	300	0.71	0.72	0.71
350	350	0.72	0.72	0.72
450	350	3.63	3.62	3.62

Gráfico 3.9.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa



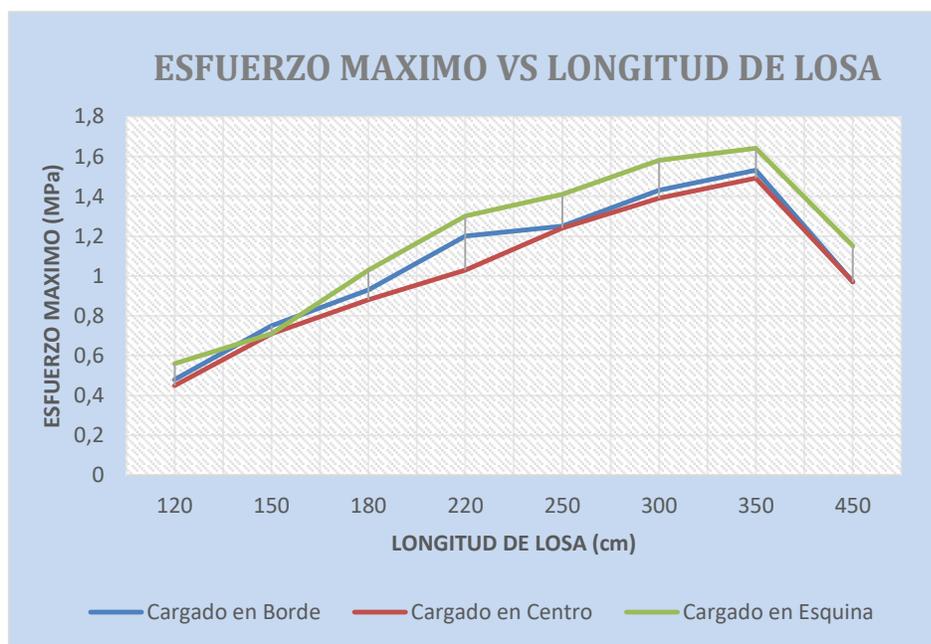
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.48	0.45	0.56
150	150	0.75	0.71	0.71

180	180	0.93	0.88	1.03
220	220	1.20	1.03	1.30
250	250	1.25	1.24	1.41
300	300	1.43	1.39	1.58
350	350	1.53	1.49	1.64
450	350	0.97	0.97	1.15

Gráfico 3.9.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa



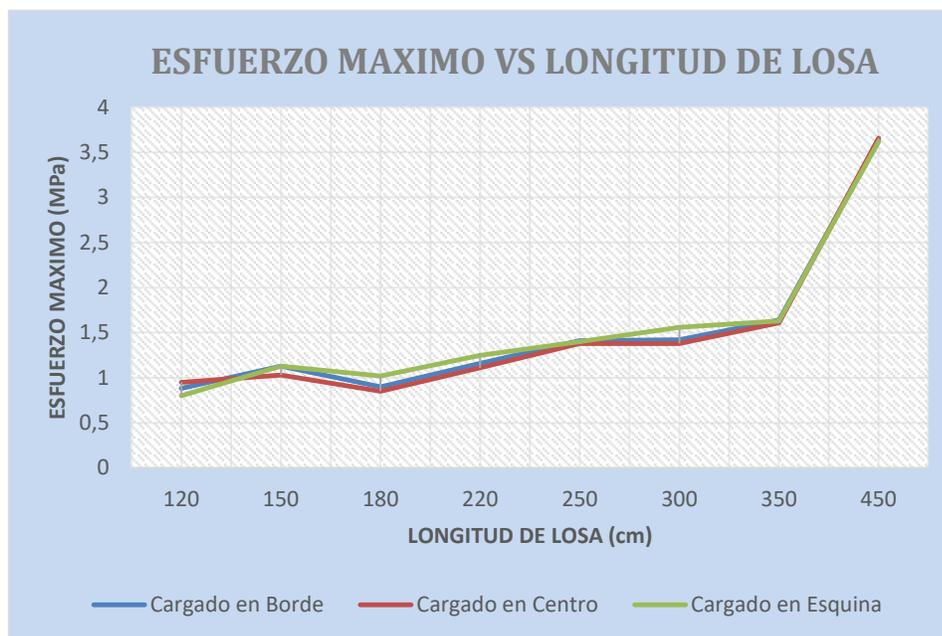
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3.6.3 Resultados utilizando un eje tridem

Tabla 3.18 Esfuerzos máximos absolutos

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.88	0.95	0.8
150	150	1.13	1.03	1.13
180	180	0.90	0.85	1.02
220	220	1.16	1.11	1.25
250	250	1.41	1.38	1.40
300	300	1.42	1.38	1.56
350	350	1.64	1.61	1.63
450	350	3.63	3.66	3.62

Gráfico 3.10 Esfuerzos máximos absolutos

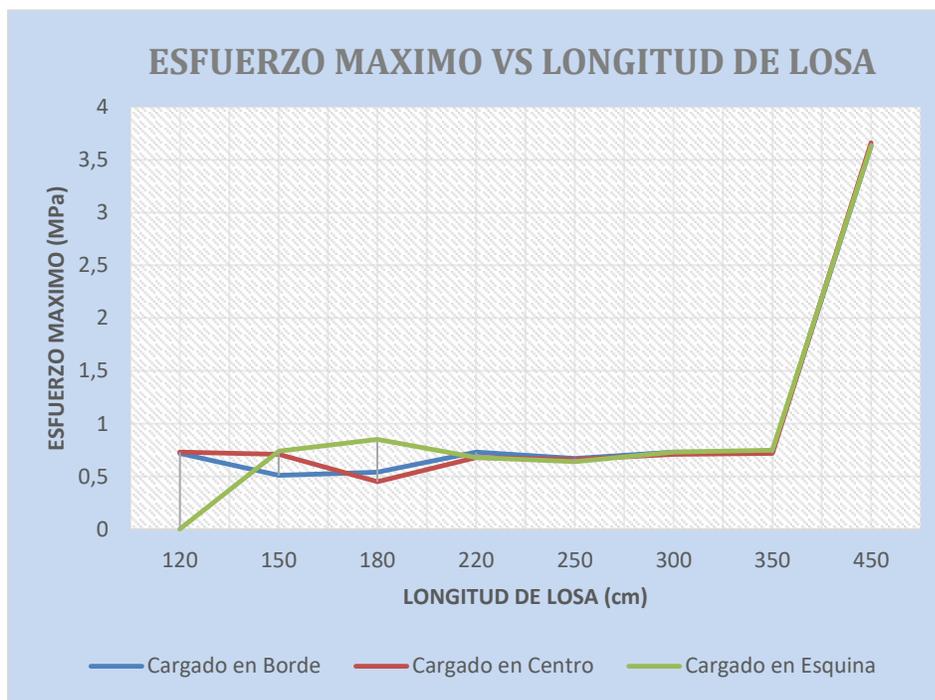


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.72	0.73	0,67
150	150	0.51	0.71	0.74
180	180	0.54	0.45	0.85
220	220	0.73	0.68	0.68
250	250	0.67	0.66	0.64
300	300	0.73	0.71	0.73
350	350	0.73	0.72	0.75
450	350	3.63	3.66	3.63

Gráfico 3.10.1 Esfuerzos máximos parte superior de la losa



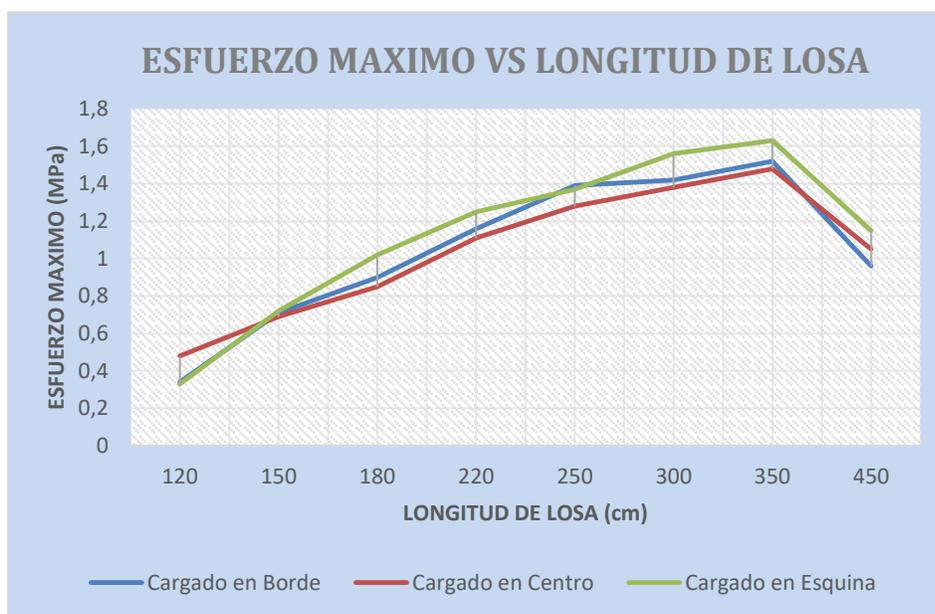
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa

Longitud (cm)	Ancho (cm)	Esfuerzos máximos absolutos (MPa)		
		Borde	Centro	Esquina
120	120	0.34	0.48	0.33
150	150	0.71	0.69	0.72
180	180	0.90	0.85	1.02
220	220	1.16	1.11	1.25
250	250	1.39	1.28	1.37
300	300	1.42	1.38	1.56

350	350	1.52	1.48	1.63
450	350	0.96	1.05	1.15

Gráfico 3.10.2 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa



Fuente: Elaboración propia

#### 3.1.3.6.4 Análisis e interpretación de las gráficas

En los gráficos se puede observar que los esfuerzos máximos generados por las simulaciones del comportamiento de las losas de superficie cortas menores a las tradicionales, son máximos en la esquina de las losas, identificando este punto como crítico.

Se puede observar también que los esfuerzos presentan valores máximos en la parte superior de las losas esto es debido a que la estructura del pavimento en la parte superior resiste directamente las cargas impuestas del tráfico y de las condiciones ambientales.

Las gráficas representan la variación de los esfuerzos según las cargas aplicadas y son ascendentes según se incrementa los ejes de simple, tándem y tridem esto es debido a que se acrecienta el peso de acuerdo a los ejes.

En las gráficas de esfuerzos máximos absolutos, de los tramos representativos se observa que los esfuerzos son menores entre las geometrías cuadradas de las losas de 120 cm a 350 cm.

En este proceso de análisis de los esfuerzos tomaremos como valor representativo los valores producidos en una losa de 180cm debido a que esta representa valores de esfuerzos en un rango que engloba a la mayoría de los datos representados.

Con los valores de los esfuerzos de la muestra representativa se realizara un análisis para verificar que los esfuerzos cumplan con el criterio del 50% del módulo de rotura del pavimento, el cual será desglosado a continuación para cada tramo en estudio.

#### **3.1.4 Análisis del desempeño estructural en losas cortas de pavimento rígido mediante la determinación de esfuerzos**

Las soluciones de análisis estructural han tenido gran desarrollo tecnológico en las últimas décadas, han pasado de sencillas fórmulas y derivaciones complejas a programas computacionales de modelación de losa con graficas en tres dimensiones.

Una de las últimas metodologías es el análisis estructural por el método de <sup>5</sup>elementos finitos, lo cual se describe en el capítulo 2 de este trabajo. Este método considera que los esfuerzos en un pavimento rígido son el resultado de la interacción de diversos factores, en esta etapa del análisis luego de haber procedido con los anteriores pasos:

- De ingresar todos los datos requeridos en el programa de elementos finitos.
- De modelar una estructura de pavimento con un gradiente térmico más la carga estructural.
- Se revisa que el esfuerzo máximo en la losa no sea mayor del 50% del

Módulo de Rotura (MR) del pavimento.

---

<sup>5</sup> Análisis y Diseño de Pavimento, Yang H. Huang, Segunda Edición, pagina 7, párrafo 5.

Se toma el 50% del Módulo de rotura basados en el experimento de Bate (Clemmer, 1923) que afirma; “Un esfuerzo de flexión inducida podría ser repetida indefinidamente sin causar ruptura, siempre que la intensidad de esfuerzo en las fibras no exceda aproximadamente 50% del módulo de rotura del pavimento”.<sup>1</sup>

### 3.1.4.1 Tablas resumen de resultados de las simulaciones

Se tomarán como base los valores de los esfuerzos producidos en una losa de 1.8x1.8.

Tabla 3.19 Losas de pavimento rígido para la ciudad de Villamontes

Posición	Módulo de ruptura (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Criterio del 50% < MR
Eje Simple - Borde	4.50	2.09	46.44 % - Cumple
Eje Simple - Centro	4.50	0.95	21.11 % - Cumple
Eje Simple - Esquina	4.50	1.17	26.00 % - Cumple
Eje Tandem - Borde	4.50	0.96	21.33 % - Cumple
Eje Tandem - Centro	4.50	0.92	20.44 % - Cumple
Eje Tandem - Esquina	4.50	1.08	24.00 % - Cumple
Eje Tridem - Borde	4.50	0.97	21.56 % - Cumple
Eje Tridem - Centro	4.50	0.92	20.44 % - Cumple
Eje Tridem - Esquina	4.50	1.05	23.33 % - Cumple

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20 Losas de pavimento rígido para la ciudad de Yacuiba

Posición	Módulo de ruptura (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Criterio del 50% < MR
Eje Simple - Borde	4.00	0.88	22.00 % - Cumple
Eje Simple - Centro	4.00	0.94	23.50 % - Cumple
Eje Simple - Esquina	4.00	0.88	22.00 % - Cumple
Eje Tandem - Borde	4.00	0.93	23.25 % - Cumple
Eje Tandem - Centro	4.00	0.92	23.00 % - Cumple
Eje Tandem - Esquina	4.00	0.87	21.75 % - Cumple
Eje Tridem - Borde	4.00	0.98	24.50 % - Cumple
Eje Tridem - Centro	4.00	0.94	23.50 % - Cumple
Eje Tridem - Esquina	4.00	1.14	28.50 % - Cumple

Tabla 3.21 Losas de pavimento rígido para la población de Entre Ríos

<b>Posición</b>	<b>Módulo de ruptura (MPa)</b>	<b>Esfuerzo máximo (MPa)</b>	<b>Criterio del 50% &lt; MR</b>
Eje Simple - Borde	4.40	0.94	21.36 % - Cumple
Eje Simple - Centro	4.40	0.84	19.09 % - Cumple
Eje Simple - Esquina	4.40	1.12	25.45 % - Cumple
Eje Tandem - Borde	4.40	0.93	21.14 % - Cumple
Eje Tandem - Centro	4.40	0.88	20.00 % - Cumple
Eje Tandem - Esquina	4.40	1.03	23.41 % - Cumple
Eje Tridem - Borde	4.40	0.90	20.45 % - Cumple
Eje Tridem - Centro	4.40	0.85	19.32 % - Cumple
Eje Tridem - Esquina	4.40	1.02	23.18 % - Cumple

Fuente: Elaboración propia

Los resultados resumidos en las tablas anteriores muestran que se cumplen con los criterios; que el esfuerzo máximo de las losas cortas de pavimento rígido no es mayor del 50% del módulo de rotura.

## **3.2 METODOLOGÍA 2 (EVALUACIÓN DE RESISTENCIA EN VIGAS DE HORMIGÓN)**

### **3.2.1 Evaluación de resistencias**

Evaluación de la rotura de vigas modelo de hormigón; sometidas a esfuerzos de flexión.

### **3.2.2 Selección de los materiales**

Los materiales empleados en la construcción de carreteras, deben cumplir con requisitos y especificaciones técnicas, que garanticen un buen desempeño durante su periodo de vida.

Para el presente trabajo de investigación se utilizó materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustaran a las normativas establecidas para el diseño de pavimentos rígidos. Además de tenerlos a disponibilidad.

Imagen 3.1 Acopio de material



Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.3 Caracterización de los materiales

Imagen 3.2 Agua

Imagen 3.3 Arena



Imagen 3.4 Grava



Imagen 3.5 Cemento



Fuente: Elaboración propia

- **Granulometría**

Dentro del análisis de los suelos, se encuentra el de la granulometría, que no es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforman el suelo. Esto se realiza con la ayuda de un juego de mallas, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASHTO, en donde se obtienen los pesos que se retienen en la malla, referido al peso total que se utiliza en el ensayo.

El factor fundamental del ensayo es la curva granulométrica, que se dibuja en una escala logarítmica.

### 3.2.3.1 Granulometría de la arena

Imagen 3.6 Cuarteo de arena para granulometría



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.7 Tamizado y pesado de la arena



Fuente: Elaboración propia

### Resultados Obtenidos

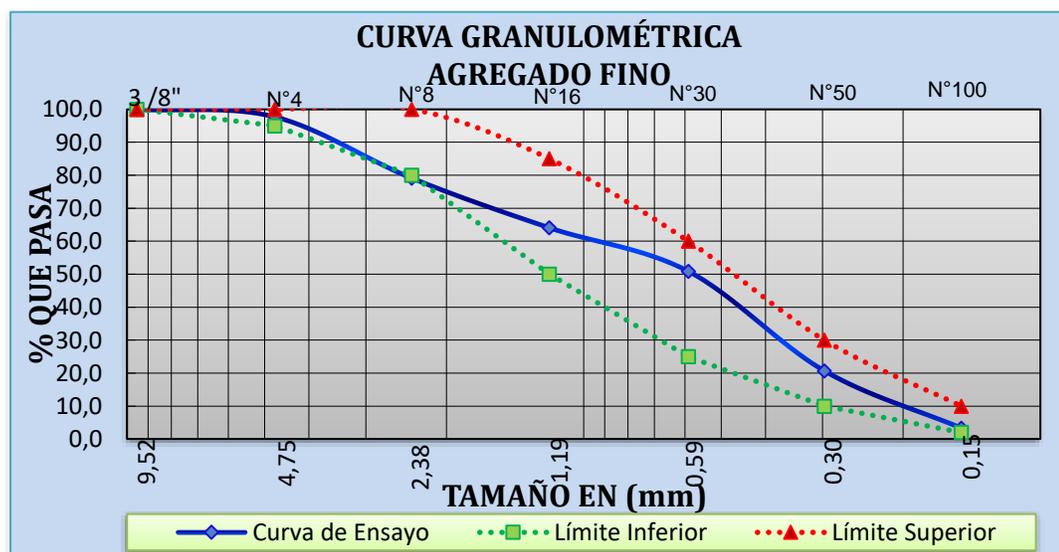
Los porcentajes que pasaron los tamices correspondientes son:

Tabla 3.22 Granulometría del agregado fino-arena

Tamices (Plg.)	Tamaño (mm)	Peso retenido (gr)	Retenido acumulado	% retenido	% que pasa del total	Especificación	
						ASTM C-33	
3/8	9.52	0	0	0	100	100	100
N°4	4.75	24.90	24.90	2.27	97.70	95	100
N°8	2.38	204.30	229.20	20.86	79.10	80	100
N°16	1.19	165.40	394.60	35.91	64.10	50	80
N°30	0.59	145.00	539.60	49.11	50.90	25	100
N°50	0.30	332.10	871.70	79.33	20.70	10	30
N°100	0.15	190.50	1062.20	96.67	3.30	2	10
Base		36.40	1098.60	99.98	0		
<b>Suma</b>		1098.60					
<b>Pérdidas</b>		0.20					
<b>MF</b>		2.84					

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.11 Curva granulométrica del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.23 Porcentaje de humedad y absorción

<b>Humedad (%)</b>	
<b>Dato</b>	<b>gr</b>
<b>Peso muestra húmeda</b>	1130
<b>Peso muestra seca</b>	111.10
<b>Peso agua</b>	11.90
<b>% de humedad</b>	1.10

Fuente:

<b>Absorción (%)</b>	
<b>Dato</b>	<b>gr</b>
<b>Peso muestra húmeda (SSS)</b>	500
<b>Peso muestra seca</b>	493.90
<b>Peso agua</b>	6.10
<b>% de absorción</b>	1.20

Elaboración propia

### 3.2.3.2 Peso específico de la arena

Imagen 3.8 Secado de la arena



Imagen 3.9 Molde cónico con arena



Imagen 3.10 Matraz con arena sumergida



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.24 Resultados obtenidos porcentaje de absorción

Peso muestra (gr)	Peso matraz (gr)	Muestra + matraz + agua (gr)	Peso del agua agregado al matraz "W" (gr)	Peso muestra secada "A" (gr)	Volumen del matraz "V" (ml)	Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
500	431.90	1750.80	818.90	439.90	1011.90	2.56	2.59	2.64	1.22
500	431.90	1750.80	818.90	439.90	1011.90	2.56	2.59	2.64	1.22
500	431.90	1750.80	818.90	439.90	1011.90	2.56	2.59	2.64	1.22
Promedio						2.56	2.59	2.64	1.22

### 3.2.3.3 Peso unitario de la arena

Imagen 3.11 Molde cilíndrico de 3litros de volumen



Imagen 3.12 Molde con muestra suelta



Imagen 3.13 Molde con muestra compactado



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.25 Peso unitario suelto de la arena

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm <sup>3</sup> )	Peso recipiente + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )
1	1345	2094	4653	3308	1.58
2	1345	2094	4659	3314	1.58
3	1345	2094	4671	3326	1.59
<b>Promedio</b>					1.58

Tabla 3.26 Peso unitario compacto de la arena

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm <sup>3</sup> )	Peso recipiente + muestra apisonada (gr)	Peso muestra apisonada (gr)	Peso unitario apisonado (gr/cm <sup>3</sup> )
1	1345	2094	4839	3494	1.67
2	1345	2094	4845	3500	1.67
3	1345	2094	4829	3484	1.66
<b>Promedio</b>					1.67

### 3.2.3.4 Granulometría para la grava

Imagen 3.14 Agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.15 Tamizado y pesado de la grava



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.27 Granulometría del agregado grueso

Peso total (gr.)							11507	
Tamices (plg)	Tamaño (mm)	Peso retenido	Retenido acumulado		% que pasa del total	% que pasa s/g		
			(gr)	(%)		Especificaciones ASTM		
2 1/2"	63	0	0	0	100	100	100	
2	50.80	0	0	0	100	95	100	
1 1/2	38.10	0	0	0	100	95	100	
1	25.40	0	0	0	100			
3/4	19.05	712	712	6.19	93.80	35	70	
1/2	12.70	4597	5309	46.14	53.90			
3/8	9.52	2756	8065	70.09	29.90	10	30	
N°4	4.75	3216	11281	98.04	2	0	5	
N°8	2.38	171	11452					
Base	0	50	11502	99.96	0			
<b>Suma</b>		11502						
<b>Pérdidas</b>		5						
<b>MF</b>		6.74						
<b>Tamaño máximo</b>		1						

Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.12 Curva granulométrica para el agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.28 Porcentaje de absorción y humedad del agregado grueso

Humedad		Absorción	
Dato	Gr	Dato	Gr
Peso muestra húmeda	5744	Peso muestra húmeda (SSS)	4000
Peso muestra seca	5719	Peso muestra seca	3936
Peso agua	25	Peso agua	64
% de humedad	0.44	% de absorción	1.63

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3.6 Peso específico de la grava

Imagen 3.16 Muestra de grava sumergida



Imagen 3.17 secado de la grava



Fuente: Elaboración propia

Nº	Peso muestra secada A (gr)	Peso muestra saturada con sup. seca "B"	Peso muestra saturada dentro del agua "C"	Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca	Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	3936	4000	2456	2.55	2.59	2.66	1.63
2	3933	4000	2455	2.55	2.59	2.66	1.70
3	3936	4000	2456	2.55	2.60	2.66	1.63
Promedio				2.55	2.59	2.66	1.65

Tabla 3.29 Peso específico del agregado grueso

Fuente: Elaboración propia|

(B-C) = Este término es la pérdida de peso de la muestra sumergida y significa por lo tanto el volumen de agua desplazado o sea el volumen de la muestra.

### 3.2.3.6 Peso unitario de la grava

Imagen 3.18 Molde cilíndrico



Imagen 3.19 Grava sin compactar



Imagen 3.20 Grava compactada



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.30 Peso unitario suelto del agregado grueso

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm <sup>3</sup> )	Peso recipiente + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )
1	4596	14109	26680	22084	1.56
2	4596	14109	26770	22174	1.57
3	4596	14109	26730	22134	1.57
<b>Promedio</b>					1.57

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.31 Peso unitario compacto del agregado grueso.

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm <sup>3</sup> )	Peso recipiente + muestra apisonada (gr)	Peso muestra apisonada (gr)	Peso unitario apisonado (gr/cm <sup>3</sup> )
1	4596	14109	27800	23204	1.64
2	4596	14109	27780	23184	1.64
3	4596	14109	27830	23234	1.65
<b>Promedio</b>					1.64

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.4 Agua

Su función es permitir la hidratación del cemento y hacer manejable la mezcla:

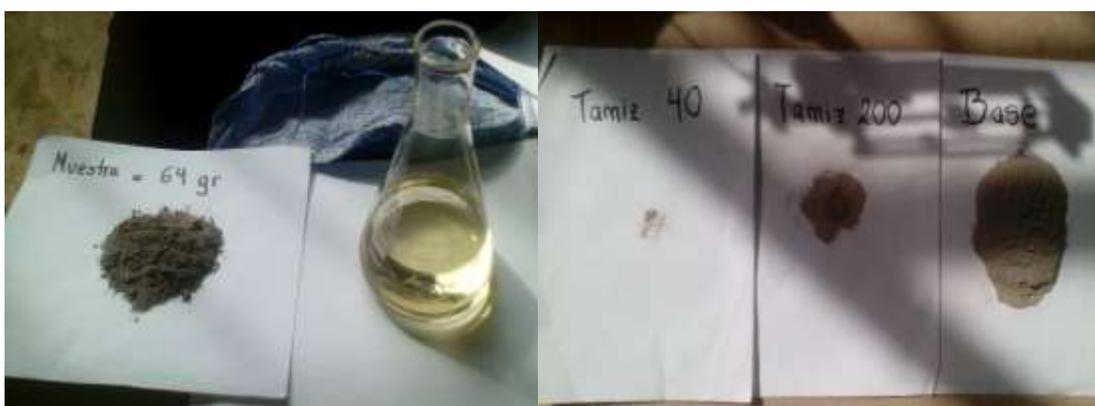
- Debe ser limpia y libre de cualquier sustancia perjudicial al pavimento terminado

- En general, se considera adecuada el agua que sea apta para el consumo humano

### 3.2.5 Cemento

**Cemento.-** Siempre y cuando no se indique lo contrario, se empleará cemento Portland disponible en el país (Clase I - ASTM).

Imagen 3.21 Finura del cemento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.32 Finura del cemento

Datos obtenidos en laboratorio					
Parámetro	Unidad	Observaciones			Promedio de
Peso retenido en tamiz N°40 + peso de la hoja (WN°40)	gr	0.05	0.05	0.04	finura del cemento
Peso retenido en tamiz N°200 + peso de la hoja (WN°200)	gr	8.70	9.45	8.45	10.83 %
Peso retenido en la	gr	40.58	39.60	40.70	

base + peso de la hoja (Wb)					
Finura del cemento (F)	%	17.50	19.00	16.98	

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.6 Requisitos del hormigón

El hormigón se preparará de acuerdo a las normas del código Boliviano del hormigón y cemento portland o puzzolánico, empleando agregados graduados.

La composición de la mezcla de hormigón será de manera que:

Demuestre una buena consistencia plástica, de acuerdo a las exigencias del código Boliviano del hormigón armado CBH-87.

Después del fraguado y endurecimiento, cumpla las exigencias de resistencia, durabilidad e impermeabilidad en las construcciones de hormigón.

#### 3.2.6.1 Resistencia mecánica de hormigón

La resistencia del hormigón para pavimentos rígidos, se mide por su resistencia a la flexión sobre la base de una propiedad llamada módulo de rotura, que se determina por medio de los ensayos de resistencia al flexo tracción del hormigón, empleando la viga con cargas a los tercios del claro (ASTM C 78).

#### 3.2.6.2 Dosificación del hormigón

Datos empleados según la combinación de áridos para estar dentro de las granulometrías recomendadas.

Tabla 3.33 Combinación de áridos

Tabla 3.34 Dosificación del hormigón

<b>Tipo de cemento</b>	<b>IP</b>
------------------------	-----------

Cantidad de cemento (kg)	450
Cantidad de cemento (lbs)	143.31
Cono buscado	2
Relación A/C	0.40
Tamaño máximo árido (mm)	1"
Cantidad de agua (lbs)	180
Cantidad de aire (lbs)	14
Total de áridos (lbs.)	662.69

	<b>Arena</b>	<b>Gravilla</b>	<b>Grava</b>
% humedad	1.10		0.44
% absorción	1.20		1.65
% de finos	2.84		6.74
P.U.S. natural	1.58		1.57
P.E. seco	2.56		2.55
% de mezcla	33		67

Fuente: Elaboración propia

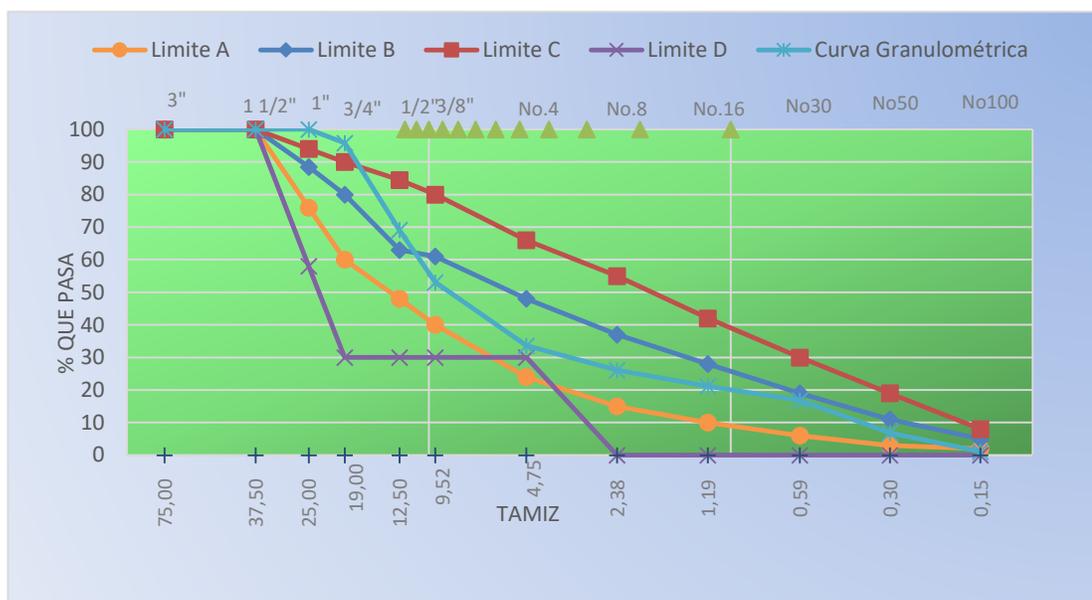
Tabla 3.35 Dosificación ajustada

<b>Tamiz</b>		<b>Arena % que pasa</b>	<b>Gravilla % que pasa</b>	<b>Grava % que pasa</b>	<b>C 1</b>
<b>Nº</b>	<b>mm</b>				
Nº 100	0.15	3.30	0	0	1.09
Nº 50	0.29	20.70	0	0	6.83
Nº 30	0.59	50.90	0	0	16.80
Nº 16	1.19	64.10	0	0	21.15
Nº 8	2.38	79.10	0	0	26.10
Nº 4	4.75	97.70	0	2	33.58
3/8"	9.52	100	0	29.90	53.03
1/2"	12.50	100	0	53.90	69.11
3/4"	19	100	0	93.80	95.85
1"	25	100	0	100	100

1 1/2"	37.50	100	0	100	100
3"	75	100	0	100	100

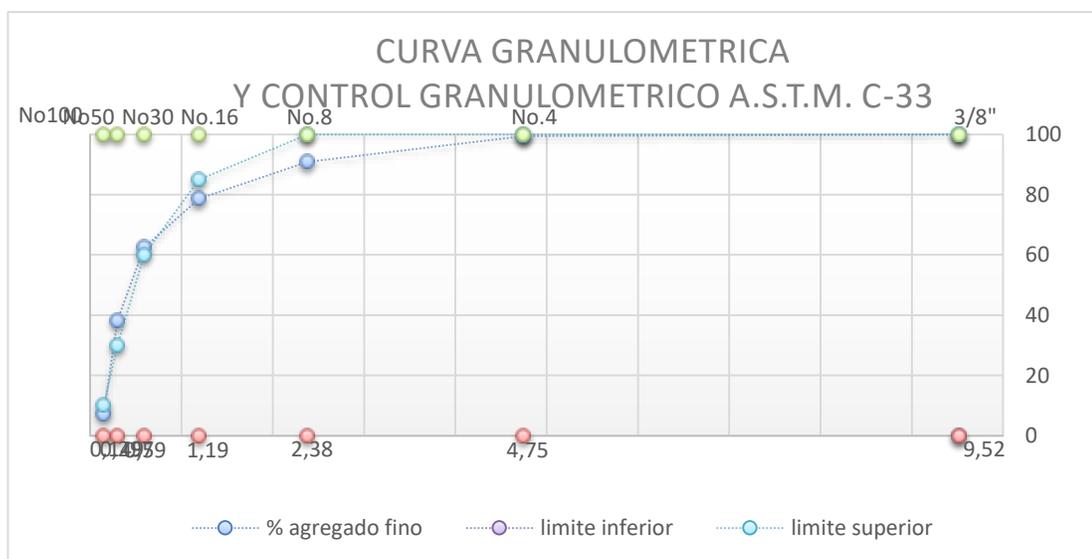
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.13 Curva granulométrica ajustada



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.14 Curva granulométrica y control granulométrico



Fuente: Elaboración propia

### 3.2.6.3 Dosificación en peso (método práctico)

#### Agregados secos

$$V_{\text{total de agregados}} = 1000 - \text{cantidad}_{\text{cemento}} - \text{cantidad}_{\text{agua}} - \text{cantidad}_{\text{aire}}$$

$$\text{Vol. Total Agregado} = 662.69 \text{ litros}$$

$$\text{arena} = \frac{\% \text{mezcla arena}}{100} * \text{P. E. seco}_{\text{arena}} * V_{\text{total del agregado}}$$

$$\text{grava} = \frac{\% \text{mezcla grava}}{100} * \text{P. E. seco}_{\text{grava}} * V_{\text{total del agregado}}$$

$$\text{Arena} = 559.84$$

$$\text{Gravilla} = 0$$

$$\text{Grava} = 1132.20$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Arena} = 559.84 \\ \text{Gravilla} = 0 \\ \text{Grava} = 1132.20 \end{array} \right\} \text{ Suma total agregado} = 1692.04 \text{ Kg}$$

#### Corrección

$$\text{corrección} = \frac{\% \text{mezcla}}{100} * \sum \text{total de agregado}$$

$$\text{Arena} = 558.37 \text{ Kg}$$

$$\text{Gravilla} = 0 \text{ Kg}$$

$$\text{Grava} = 1133.67 \text{ Kg}$$

#### Dosificación para agregado seco

$$\text{Cantidad de cemento} = 450 \text{ Kg}$$

$$\text{Agua} = 180 \text{ Litros}$$

Arena corregida = 558 Kg

Gravilla corregida = 0 Kg

Grava corregida = 1134 Kg

**Agregados saturados superficialmente secos** (corrección por absorción)

$$\text{corrección por absorción} = \text{arena}_{\text{corregida}} * \frac{\% \text{absorción}}{100}$$

Arena = 6.70 Kg

Gravilla = 0 Kg

Grava = 18.71 Kg

Total = 25.41 Kg

**Dosificación para agregados saturados superficialmente secos**

$$\text{agua} = \text{agua}_{\text{inicial}} + \text{agua}_{\text{corregida por absorción}}$$

Cemento de planilla = 450 Kg

Agua = 205 Litros

Arena corregida = 558 Kg

Gravilla = 0 Kg

Grava corregida = 1.134 Kg

**Corrección por humedad**

$$\text{arena } \mathbf{0} = \text{arena}_{\text{corregida}} * \frac{100}{100 - \% \text{ de humedad arena}}$$

$$\text{grava } \mathbf{0} = \text{grava}_{\text{corregida}} * \frac{100}{100 - \% \text{ de humedad grava}}$$

$$\text{arena corregida } \mathbf{1} = \text{arena } \mathbf{0} - \text{arena}_{\text{corregida}}$$

$$\text{grava corregida } \mathbf{1} = \text{grava } \mathbf{0} - \text{grava}_{\text{corregida}}$$

Arena 0 = 564.21 Kg

Gravilla 0 = 0 Kg

Grava 0 = 1139.01 Kg

Arena corregida 1 = 6.21 Kg

Gravilla corregida 1 = 0 Kg

Grava corregida 1 = 5.01

Total = 11.22 kg

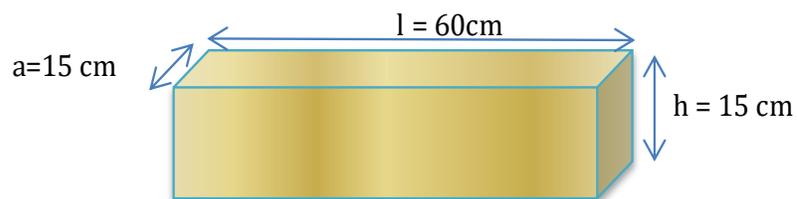
### Dosificación final con áridos húmedos

Tabla 3.36 Dosificación obtenida para el hormigón

Dosificación obtenida		
Material	Por m <sup>3</sup>	Por Bolsa
Cemento (Kg)	450	50
Agua (Litros)	194	22
Arena (kg)	564	63
Gravilla (kg)	0	0
Grava (Kg)	1139	127

### 3.2.6.4 Dosificación aconsejada por molde

Gráfico 3.15 Dimensión de los moldes



$$V = h * l * a$$

Volumen del molde = 13500 cm<sup>3</sup>

Tabla 3.37 Dosificación por molde

<b>Dosificación aconsejada por molde</b>		
<b>Material</b>	<b>Por molde</b>	<b>Total moldes</b>
<b>Cemento (Kg)</b>	6	108
<b>Agua (Litros)</b>	3	54
<b>Arena (kg)</b>	8	144
<b>Gravilla (kg)</b>	0	0
<b>Grava (Kg)</b>	15	270

Fuente: Elaboración propia

### **3.2.7 Vaciado del hormigón en moldes**

#### **Toma de muestras del hormigón fresco.**

Como ya se ha dicho, vamos a fabricar probetas rectangulares de dimensiones 15\*15\*60 cm, de hormigón

Imagen 3.22 Preparación de moldes para vigas



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.23 Mezclado de hormigón



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.24 Cono de Abrams



Imagen 3.25 Asentamiento



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.26 Llenado de moldes



Fuente: Elaboración propia

### **3.3.8 Curado de las vigas después de desencofrar**

Imagen 3.27 Desmolde de vigas



Imagen 3.28 Curado de vigas



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.9 Evaluación de resistencias en las vigas de hormigón

Imagen 3.29 Máquina con carga centrada



Imagen 3.30 Rotura de vigas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.38 Controles de rotura para los moldes de hormigón

Molde N°	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	área (cm <sup>2</sup> )	Carga en (KN)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	factor de corrección	Proyección en 28 días (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	15/10/2012	12/11/2012	28	900	28.95	29.51	32.79	1	32.79
2	15/10/2012	12/11/2012	28	900	29.65	30.22	33.58	1	33.58
3	15/10/2012	12/11/2012	28	900	26.55	27.06	30.07	1	30.07
4	15/10/2012	12/11/2012	28	900	29.3	29.87	33.19	1	33.19
5	15/10/2012	12/11/2012	28	900	23.75	24.21	26.90	1	26.90
6	15/10/2012	12/11/2012	28	900	21.65	22.07	24.52	1	24.52
7	15/10/2012	12/11/2012	28	900	20.67	21.07	23.41	1	23.41
8	15/10/2012	12/11/2012	28	900	29.15	29.71	33.02	1	33.02
9	15/10/2012	12/11/2012	28	900	23.3	23.75	26.39	1	26.39
10	27/10/2017	24/11/2017	28	900	27.85	28.39	31.54	1	31.54
11	27/10/2017	24/11/2017	28	900	28.56	29.11	32.35	1	32.35
12	27/10/2017	24/11/2017	28	900	22.55	22.99	25.54	1	25.54
13	27/10/2017	24/11/2017	28	900	24.1	24.57	27.30	1	27.30
14	27/10/2017	24/11/2017	28	900	22.56	23.00	25.55	1	25.55
15	27/10/2017	24/11/2017	28	900	25.05	25.54	28.37	1	28.37
16	27/10/2017	24/11/2017	28	900	25.46	25.95	28.84	1	28.84
17	27/10/2017	24/11/2017	28	900	26.12	26.63	29.58	1	29.58
18	27/10/2017	24/11/2017	28	900	20.35	20.74	23.05	1	23.05

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 METODOLOGÍA 3 (VIGA BENKELMAN)

### 3.3.1 Control deflectométrico en las zonas de estudio

- 1) Para el desarrollo de esta metodología, la medición de deflexiones se efectuó sobre la superficie del pavimento mediante el deflectómetro conocido como la viga Benkelman.

Imagen 3.31 Viga Benkelman



Fuente: Elaboración propia

- 2) La medición de deflexiones se realizó a lo largo de un eje longitudinal paralelo al eje de la vía.

- 3) Punto de ensayo

El punto de ensayo será localizado a una distancia prefijada del borde.

- 4) Instalación del equipo

Para medir las deflexiones en la superficie del pavimento, se usó la viga Benkelman de brazo simple rebatible 1:1.

Se coloca la viga sobre el pavimento, detrás del camión, perpendicularmente al eje de carga, de modo que la punta de prueba del brazo móvil coincida con el punto de ensayo y la viga no roce contra las cubiertas de las llantas de la rueda dual. Dado que esto último se dificulta por la inaccesibilidad tanto visual como manual, se realizó previamente la siguiente operación: Se coloca la viga entre las llantas en la parte exterior de las mismas.

Una vez instalada la viga en el punto de medición, se verificará que esta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión.

Imagen 3.32 Alineación del dial respecto a la dirección del camión



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se retira o liberan los seguros del o brazos móviles y se ajusta la base de la viga por medio del tornillo trasero, de manera que el o los brazos móviles de medición quede en contacto con el vástago del ó diales.

Imagen 3.33 Instalación del equipo



Fuente: Elaboración propia

Medidas

Los ensayos para la medición de deflexiones con viga Benkelman se efectuaron en forma igualmente espaciados a una distancia de 50 m. Cada ensayo consistió en la ejecución de 7 lecturas para determinación de la deformada que adopta la superficie de la capa del pavimento, también llamada “curva de deflexión”, las que se efectuaron a 0, 25, 50, 100, 150, 200 y 500 cm respectivamente y desfasadas desde el punto inicial de aplicación de carga.

Imagen 3.34 Espaciamiento para lecturas



Fuente: Elaboración propia

**1) Inicio de lectura**

Segmentos de medición, se gira la esfera del dial del extensómetro de la viga Benkelman.

Una vez marcados los hasta que la aguja quede en cero y se verifica la lectura golpeando suavemente con un lápiz y poniendo en marcha el vibrador de la viga. Girar la esfera si es necesario y repetir la operación hasta obtener la posición cero (0).

**2) Medida de temperatura**

Antes de iniciar las lecturas de deflexiones se debe proceder a la medición de la temperatura del pavimento.

La temperatura se mide colocando el termómetro directamente sobre la superficie del pavimento.

**3) Lecturas a diferentes distancias**

Establecida la lectura inicial en cero, se hace avanzar suave y lentamente el camión procediéndose a tomar las lecturas, conforme el eje de la rueda del camión vaya coincidiendo con la primera, segunda y demás marcas adicionales y una lectura final cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo hasta una distancia de 4 a 5 mt aproximadamente en que el indicador del dial ya no tenga movimiento, registro que corresponde al punto de referencia con deflexión cero.

Imagen 3.35 Representación del ensayo en campo



Fuente: Elaboración propia

Las lecturas se toman en el dial y corresponden a componentes de deformación en un proceso de descarga.

### 3.3.2 Determinación de deflexiones

#### Método de la viga Benkelman

Proyecto: Pavimento rígido con losas cortas

Pavimento rígido área urbana de Villamontes

Tabla 3.39 Registro de campo de la ciudad de Villamontes

Segm. Nº	Fecha	Progresiva	Temp. Pav.°C	Lecturas de campo (0.01mm)						
				Lo	L25	L50	L100	L150	L200	L500
				0 (cm)	25 (cm)	50 (cm)	100 (cm)	150 (cm)	200 (cm)	500 (cm)
1	18/Oct/17	42+200	35.0	0	0.08	0.14	0.60	0.60	0.12	0.12
2	18/Oct/17	42+240	36.0	0	0.14	0.10	0.14	0.18	0.22	0.24
3	18/Oct/17	42+280	36.0	0	0.10	0.12	0.20	0.24	0.26	0.28
4	18/Oct/17	42+320	36.0	0	0.04	0.18	0.21	0.22	0.24	0.26
5	18/Oct/17	42+360	36.0	0	0.08	0.12	0.16	0.14	0.16	0.18
6	18/Oct/17	42+400	36.5	0	0.06	0.10	0.12	0.14	0.18	0.24
7	18/Oct/17	42+440	36.5	0	0.02	0.14	0.14	0.16	0.18	0.20
8	18/Oct/17	42+480	36.5	0	0.14	0.18	0.22	0.26	0.24	0.18
9	18/Oct/17	42+520	37.0	0	0.02	0.08	0.20	0.22	0.26	0.30
10	18/Oct/17	42+560	37.0	0	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.20
11	18/Oct/17	42+600	37.0	0	0.10	0.12	0.16	0.18	0.20	0.22
12	18/Oct/17	42+640	37.0	0	0.04	0.08	0.10	0.12	0.16	0.20
13	18/Oct/17	42+680	37.0	0	0.02	0.14	0.16	0.18	0.22	0.24
14	18/Oct/17	42+720	37.0	0	0.08	0.12	0.14	0.14	0.16	0.20
15	18/Oct/17	42+760	37.5	0	0.03	0.10	0.12	0.20	0.20	0.24
16	18/Oct/17	42+800	37.5	0	0.08	0.08	0.12	0.16	0.18	0.12
17	18/Oct/17	42+840	37.5	0	0.14	0.12	0.16	0.18	0.20	0.22

<b>18</b>	18/Oct/17	42+880	37.5	0	0.06	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26
<b>19</b>	18/Oct/17	42+920	37.5	0	0.01	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22
<b>20</b>	18/Oct/17	42+960	37.5	0	0.14	0.08	0.14	0.22	0.24	0.36
<b>21</b>	18/Oct/17	43+000	38.0	0	0.10	0.10	0.12	0.14	0.16	0.20
<b>22</b>	18/Oct/17	43+040	38.0	0	0.06	0.14	0.16	0.16	0.20	0.24
<b>23</b>	18/Oct/17	43+080	38.0	0	0.12	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
<b>24</b>	18/Oct/17	43+120	38.0	0	0.01	0.14	0.16	0.20	0.22	0.24
<b>Segm. Nº</b>	<b>Fecha</b>	<b>Progresiva</b>	<b>Temp. Pav.°C</b>	<b>Lecturas de campo (0.01mm)</b>						
				<b>Lo</b>	<b>L25</b>	<b>L50</b>	<b>L100</b>	<b>L150</b>	<b>L200</b>	<b>L500</b>
				<b>0 (cm)</b>	<b>25 (cm)</b>	<b>50 (cm)</b>	<b>100 (cm)</b>	<b>150 (cm)</b>	<b>200 (cm)</b>	<b>500 (cm)</b>
<b>25</b>	18/Oct/17	43+160	38.0	0	0.14	0.10	0.12	0.16	0.18	0.18
<b>26</b>	18/Oct/17	43+200	37.5	0	0.10	0.18	0.20	0.22	0.26	0.30
<b>27</b>	18/Oct/17	43+240	37.5	0	0.06	0.10	0.14	0.18	0.20	0.30
<b>28</b>	18/Oct/17	43+280	37.5	0	0.14	0.08	0.16	0.18	0.22	0.32
<b>29</b>	18/Oct/17	43+320	37.5	0	0.01	0.10	0.14	0.18	0.20	0.34
<b>30</b>	18/Oct/17	43+360	37.5	0	0.14	0.14	0.16	0.22	0.26	0.32
<b>31</b>	18/Oct/17	43+400	37.5	0	0.01	0.18	0.20	0.22	0.24	0.34
<b>32</b>	18/Oct/17	43+440	37.0	0	0.06	0.12	0.16	0.18	0.26	0.32
<b>33</b>	18/Oct/17	43+480	37.0	0	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.26
<b>34</b>	18/Oct/17	43+520	37.0	0	0.02	0.08	0.10	0.18	0.20	0.22
<b>35</b>	18/Oct/17	43+560	37.0	0	0.08	0.14	0.15	0.18	0.22	0.26
<b>36</b>	18/Oct/17	43+600	36.5	0	0.06	0.14	0.16	0.20	0.26	0.32
<b>37</b>	18/Oct/17	43+640	36.5	0	0.14	0.18	0.22	0.28	0.32	0.36
<b>38</b>	18/Oct/17	43+680	36.5	0	0.01	0.10	0.14	0.18	0.22	0.22
<b>39</b>	18/Oct/17	43+720	36.5	0	0.14	0.08	0.12	0.16	0.18	0.12
<b>40</b>	18/Oct/17	43+760	36.5	0	0.01	0.18	0.22	0.26	0.28	0.32

<b>41</b>	18/Oct/17	43+800	36.5	0	0.06	0.14	0.26	0.30	0.32	0.36
<b>42</b>	18/Oct/17	43+840	36.0	0	0.14	0.12	0.12	0.16	0.16	0.18
<b>43</b>	18/Oct/17	43+880	36.0	0	0.02	0.08	0.16	0.18	0.20	0.32
<b>44</b>	18/Oct/17	43+920	36.0	0	0.08	0.10	0.16	0.22	0.36	0.32
<b>45</b>	18/Oct/17	43+960	36.0	0	0.01	0.18	0.20	0.24	0.32	0.30
<b>46</b>	18/Oct/17	44+000	36.0	0	0.12	0.14	0.15	0.20	0.26	0.31
<b>47</b>	18/Oct/17	44+040	36.0	0	0.05	0.08	0.10	0.14	0.22	0.36
<b>48</b>	18/Oct/17	44+080	36.0	0	0.04	0.10	0.14	0.18	0.22	0.30
<b>49</b>	18/Oct/17	44+120	36.0	0	0.03	0.14	0.18	0.20	0.26	0.30
<b>50</b>	18/Oct/17	44+160	36.0	0	0.02	0.12	0.12	0.16	0.16	0.18

Fuente: Elaboración propia

### Determinación de deflexiones

#### Método de la viga Benkelman

Proyecto: Pavimento rígido con losas cortas

Pavimento rígido área urbana de la ciudad de Yacuiba

Tabla 3.40 Registro de campo de la ciudad de Yacuiba

Segm. Nº	Fecha	Progresiva	Temp. Pav.°C	Lecturas de campo (0.01mm)						
				Lo	L25	L50	L100	L150	L200	L500
				0 (cm)	25 (cm)	50 (cm)	100 (cm)	150 (cm)	200 (cm)	500 (cm)
<b>1</b>	24/Oct/17	12+500	30.0	0	0.07	0.13	0.54	0.54	0.11	0.11
<b>2</b>	24/Oct/17	12+540	31.0	0	0.13	0.10	0.14	0.16	0.20	0.22
<b>3</b>	24/Oct/17	12+580	32.0	0	0.09	0.12	0.20	0.22	0.23	0.25

4	24/Oct/17	12+620	32.0	0	0.04	0.18	0.21	0.20	0.22	0.23
5	24/Oct/17	12+660	32.0	0	0.07	0.12	0.16	0.13	0.14	0.16
6	24/Oct/17	12+700	32.0	0	0.05	0.10	0.12	0.13	0.16	0.22
7	24/Oct/17	12+740	32.0	0	0.02	0.14	0.14	0.14	0.16	0.18
8	24/Oct/17	12+780	32.0	0	0.13	0.18	0.22	0.23	0.22	0.16
9	24/Oct/17	12+820	31.0	0	0.02	0.08	0.20	0.20	0.23	0.27
10	24/Oct/17	12+860	31.0	0	0.07	0.10	0.12	0.13	0.14	0.18
11	24/Oct/17	12+900	31.0	0	0.09	0.12	0.16	0.16	0.18	0.20
12	24/Oct/17	12+940	31.0	0	0.04	0.08	0.10	0.11	0.14	0.18
13	24/Oct/17	12+980	31.0	0	0.02	0.14	0.16	0.16	0.20	0.22
14	24/Oct/17	13+020	31.5	0	0.07	0.12	0.14	0.13	0.14	0.18
15	24/Oct/17	13+060	31.5	0	0.03	0.10	0.12	0.18	0.18	0.22
16	24/Oct/17	13+100	31.5	0	0.07	0.08	0.12	0.14	0.16	0.11
17	24/Oct/17	13+140	31.5	0	0.13	0.12	0.16	0.16	0.18	0.20
18	24/Oct/17	13+180	31.5	0	0.05	0.18	0.20	0.20	0.22	0.23
19	24/Oct/17	13+220	31.5	0	0.01	0.14	0.16	0.16	0.18	0.20
20	24/Oct/17	13+260	30.0	0	0.13	0.08	0.14	0.20	0.22	0.32
21	24/Oct/17	13+300	30.0	0	0.09	0.10	0.12	0.13	0.14	0.18
22	24/Oct/17	13+340	30.0	0	0.05	0.14	0.16	0.14	0.18	0.22
23	24/Oct/17	13+380	30.0	0	0.11	0.12	0.14	0.14	0.16	0.18
24	24/Oct/17	13+420	30.0	0	0.01	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22
<b>Segm. Nº</b>	<b>Fecha</b>	<b>Progresiva</b>	<b>Temp. Pav.°C</b>	<b>Lecturas de campo (0.01mm)</b>						
				<b>Lo</b>	<b>L25</b>	<b>L50</b>	<b>L100</b>	<b>L150</b>	<b>L200</b>	<b>L500</b>
				<b>0 (cm)</b>	<b>25 (cm)</b>	<b>50 (cm)</b>	<b>100 (cm)</b>	<b>150 (cm)</b>	<b>200 (cm)</b>	<b>500 (cm)</b>
25	24/Oct/17	13+460	29.0	0	0.13	0.10	0.12	0.14	0.16	0.16
26	24/Oct/17	13+500	29.0	0	0.09	0.18	0.20	0.20	0.23	0.27

27	24/Oct/17	13+540	29.0	0	0.05	0.10	0.14	0.16	0.18	0.27
28	24/Oct/17	13+580	29.0	0	0.13	0.08	0.16	0.16	0.20	0.29
29	24/Oct/17	13+620	29.0	0	0.01	0.10	0.14	0.16	0.18	0.31
30	24/Oct/17	13+660	29.0	0	0.13	0.14	0.16	0.20	0.23	0.29
31	24/Oct/17	13+700	29.0	0	0.01	0.18	0.20	0.20	0.22	0.31
32	24/Oct/17	13+740	29.0	0	0.05	0.12	0.16	0.16	0.23	0.29
33	24/Oct/17	13+780	29.0	0	0.13	0.16	0.18	0.18	0.20	0.23
34	24/Oct/17	13+820	28.0	0	0.02	0.08	0.10	0.16	0.18	0.20
35	24/Oct/17	13+860	28.0	0	0.07	0.14	0.15	0.16	0.20	0.23
36	24/Oct/17	13+900	28.0	0	0.05	0.14	0.16	0.18	0.23	0.29
37	24/Oct/17	13+940	28.0	0	0.13	0.18	0.22	0.25	0.29	0.32
38	24/Oct/17	13+980	28.0	0	0.01	0.10	0.14	0.16	0.20	0.20
39	24/Oct/17	14+020	28.0	0	0.13	0.08	0.12	0.14	0.16	0.11
40	24/Oct/17	14+060	28.0	0	0.01	0.18	0.22	0.23	0.25	0.29
41	24/Oct/17	14+100	28.0	0	0.05	0.14	0.26	0.27	0.29	0.32
42	24/Oct/17	14+140	28.0	0	0.13	0.12	0.12	0.14	0.14	0.16
43	24/Oct/17	14+180	28.0	0	0.02	0.08	0.16	0.16	0.18	0.29
44	24/Oct/17	14+220	27.0	0	0.07	0.10	0.16	0.20	0.32	0.29
45	24/Oct/17	14+260	27.0	0	0.01	0.18	0.20	0.22	0.29	0.27
46	24/Oct/17	14+300	27.0	0	0.11	0.14	0.15	0.18	0.23	0.28
47	24/Oct/17	14+340	27.0	0	0.05	0.08	0.10	0.13	0.20	0.32
48	24/Oct/17	14+380	27.0	0	0.04	0.10	0.14	0.16	0.20	0.27
49	24/Oct/17	14+420	27.0	0	0.03	0.14	0.18	0.18	0.23	0.27
50	24/Oct/17	14+460	27.0	0	0.02	0.12	0.12	0.14	0.14	0.16

Fuente: Elaboración propia

## Determinación de deflexiones

### Método de la viga Benkelman

Proyecto: Pavimento rígido con losas cortas

Pavimento rígido de la población Entre Ríos

Tabla 3.41 Registro de campo de la población de Entre Ríos

Segm. Nº	Fecha	Progresiva	Temp. Pav.°C	Lecturas de campo (0.01mm)						
				Lo	L25	L50	L100	L150	L200	L500
				0 (cm)	25 (cm)	50 (cm)	100 (cm)	150 (cm)	200 (cm)	500 (cm)
1	02/Nov/17	0+320	19.0	0	0.14	0.24	0.65	0.65	0.20	0.20
2	02/Nov/17	0+360	19.0	0	0.24	0.17	0.24	0.31	0.37	0.41
3	02/Nov/17	0+400	19.0	0	0.17	0.20	0.34	0.41	0.44	0.48
4	02/Nov/17	0+440	19.0	0	0.07	0.31	0.36	0.37	0.41	0.44
5	02/Nov/17	0+480	19.0	0	0.14	0.20	0.27	0.24	0.27	0.31
6	02/Nov/17	0+520	19.0	0	0.10	0.17	0.20	0.24	0.31	0.41
7	02/Nov/17	0+560	19.5	0	0.03	0.24	0.24	0.27	0.31	0.34
8	02/Nov/17	0+600	19.5	0	0.24	0.31	0.37	0.44	0.41	0.31
9	02/Nov/17	2+060	19.5	0	0.03	0.14	0.34	0.37	0.44	0.51
10	02/Nov/17	2+100	19.5	0	0.14	0.17	0.20	0.24	0.27	0.34
11	02/Nov/17	2+140	19.5	0	0.17	0.20	0.27	0.31	0.34	0.37
12	02/Nov/17	2+180	19.5	0	0.07	0.14	0.17	0.20	0.27	0.34
13	02/Nov/17	2+220	20.0	0	0.03	0.24	0.27	0.31	0.37	0.41
14	02/Nov/17	2+260	20.0	0	0.14	0.20	0.24	0.24	0.27	0.34
15	02/Nov/17	2+300	20.0	0	0.05	0.17	0.20	0.34	0.34	0.41
16	02/Nov/17	2+340	20.0	0	0.14	0.14	0.20	0.27	0.31	0.20

17	02/Nov/17	2+380	21.5	0	0.24	0.20	0.27	0.31	0.34	0.37
18	02/Nov/17	2+420	21.5	0	0.10	0.31	0.34	0.37	0.41	0.44
19	02/Nov/17	2+460	21.5	0	0.02	0.24	0.27	0.31	0.34	0.37
20	02/Nov/17	2+500	21.5	0	0.24	0.14	0.24	0.37	0.41	0.61
21	02/Nov/17	2+540	22.0	0	0.17	0.17	0.20	0.24	0.27	0.34
22	02/Nov/17	2+580	22.0	0	0.10	0.24	0.27	0.27	0.34	0.41
23	02/Nov/17	2+620	22.0	0	0.20	0.20	0.24	0.27	0.31	0.34
24	02/Nov/17	2+660	22.0	0	0.02	0.24	0.27	0.34	0.37	0.41
<b>Segm. Nº</b>	<b>Fecha</b>	<b>Progresiva</b>	<b>Temp. Pav.°C</b>	<b>Lecturas de campo (0.01mm)</b>						
				<b>Lo</b>	<b>L25</b>	<b>L50</b>	<b>L100</b>	<b>L150</b>	<b>L200</b>	<b>L500</b>
				<b>0 (cm)</b>	<b>25 (cm)</b>	<b>50 (cm)</b>	<b>100 (cm)</b>	<b>150 (cm)</b>	<b>200 (cm)</b>	<b>500 (cm)</b>
25	02/Nov/17	2+700	22.0	0	0.24	0.17	0.20	0.27	0.31	0.31
26	02/Nov/17	2+740	22.0	0	0.17	0.31	0.34	0.37	0.44	0.51
27	02/Nov/17	2+780	22.0	0	0.10	0.17	0.24	0.31	0.34	0.51
28	02/Nov/17	2+820	23.5	0	0.24	0.14	0.27	0.31	0.37	0.54
29	02/Nov/17	2+860	23.5	0	0.02	0.17	0.24	0.31	0.34	0.58
30	02/Nov/17	2+900	23.0	0	0.24	0.24	0.27	0.37	0.44	0.54
31	02/Nov/17	2+940	23.0	0	0.02	0.31	0.34	0.37	0.41	0.58
32	02/Nov/17	2+980	22.5	0	0.10	0.20	0.27	0.31	0.44	0.54
33	02/Nov/17	3+020	22.5	0	0.24	0.27	0.31	0.34	0.37	0.44
34	02/Nov/17	3+060	22.5	0	0.03	0.14	0.17	0.31	0.34	0.37
35	02/Nov/17	3+100	22.0	0	0.14	0.24	0.26	0.31	0.37	0.44
36	02/Nov/17	3+140	22.0	0	0.10	0.24	0.27	0.34	0.44	0.54
37	02/Nov/17	3+180	22.0	0	0.24	0.31	0.37	0.48	0.54	0.61
38	02/Nov/17	3+220	19.5	0	0.02	0.17	0.24	0.31	0.37	0.37
39	02/Nov/17	3+260	19.5	0	0.24	0.14	0.20	0.27	0.31	0.20

40	02/Nov/17	3+300	19.5	0	0.02	0.31	0.37	0.44	0.48	0.54
41	02/Nov/17	3+340	19.0	0	0.10	0.24	0.44	0.51	0.54	0.61
42	02/Nov/17	3+380	19.0	0	0.24	0.20	0.20	0.27	0.27	0.31
43	02/Nov/17	3+420	18.5	0	0.03	0.14	0.27	0.31	0.34	0.54
44	02/Nov/17	3+460	18.5	0	0.14	0.17	0.27	0.37	0.61	0.54
45	02/Nov/17	3+500	17.0	0	0.02	0.31	0.34	0.41	0.54	0.51
46	02/Nov/17	3+540	17.0	0	0.20	0.24	0.26	0.34	0.44	0.53
47	02/Nov/17	3+580	16.5	0	0.09	0.14	0.17	0.24	0.37	0.61
48	02/Nov/17	3+620	16.5	0	0.07	0.17	0.24	0.31	0.37	0.51
49	02/Nov/17	3+660	16.5	0	0.05	0.24	0.31	0.34	0.44	0.51
50	02/Nov/17	3+700	16.5	0	0.03	0.20	0.20	0.27	0.27	0.31

Fuente: Elaboración propia

### Determinación de deflexiones

#### Método de la viga Benkelman

Proyecto: Pavimento rígido con losas cortas

Pavimento rígido nueva terminal de la ciudad de Tarija

Tabla 3.42 Registro de campo de la ciudad de Tarija

Segm. N°	Fecha	Progresiva	Temp. Pav.°C	Lecturas de campo (0.01mm)						
				Lo	L25	L50	L100	L150	L200	L500
				0 (cm)	25 (cm)	50 (cm)	100 (cm)	150 (cm)	200 (cm)	500 (cm)
1	25/Enero/18	0+200	19.0	0	0.02	0.12	0.12	0.16	0.16	0.16

2	25/Enero/18	0+240	19.0	0	0.04	0.08	0.14	0.22	0.24	0.24
3	25/Enero/18	0+280	19.0	0	0.06	0.08	0.12	0.16	0.10	0.11
4	25/Enero/18	0+320	19.0	0	0.04	0.10	0.16	0.10	0.08	0.12
5	25/Enero/18	0+360	19.5	0	0.03	0.05	0.07	0.06	0.05	0.12
6	25/Enero/18	0+400	19.5	0	0.02	0.04	0.05	0.06	0.04	0.16
7	25/Enero/18	0+440	19.5	0	0.03	0.06	0.06	0.07	0.04	0.13
8	25/Enero/18	0+480	20.0	0	0.04	0.08	0.10	0.12	0.07	0.12
9	25/Enero/18	0+520	20.0	0	0.04	0.04	0.09	0.10	0.06	0.20
10	25/Enero/18	0+560	20.0	0	0.02	0.04	0.05	0.06	0.04	0.13
11	25/Enero/18	0+600	20.0	0	0.03	0.05	0.07	0.08	0.05	0.15
12	25/Enero/18	0+640	20.0	0	0.02	0.04	0.04	0.05	0.03	0.13
13	25/Enero/18	0+680	20.0	0	0.03	0.06	0.07	0.08	0.05	0.16
14	25/Enero/18	0+720	20.0	0	0.03	0.05	0.06	0.06	0.04	0.13
15	25/Enero/18	0+760	20.5	0	0.02	0.04	0.05	0.09	0.04	0.16
16	25/Enero/18	0+800	20.5	0	0.02	0.04	0.05	0.07	0.04	0.08
17	25/Enero/18	0+840	20.5	0	0.03	0.05	0.07	0.08	0.05	0.15
18	25/Enero/18	0+880	20.5	0	0.04	0.08	0.09	0.10	0.06	0.17
19	25/Enero/18	0+920	21.0	0	0.03	0.06	0.07	0.08	0.05	0.15
20	25/Enero/18	0+960	21.0	0	0.03	0.04	0.06	0.10	0.04	0.24
21	25/Enero/18	1+000	21.0	0	0.02	0.04	0.05	0.06	0.04	0.13
22	25/Enero/18	1+040	21.0	0	0.03	0.06	0.07	0.07	0.05	0.16
23	25/Enero/18	1+080	21.0	0	0.03	0.05	0.06	0.07	0.04	0.13
24	25/Enero/18	1+120	21.5	0	0.03	0.06	0.07	0.09	0.05	0.16
Segm. Nº	Fecha	Progresiva	Temp. Pav.°C	<b>Lecturas de campo (0.01mm)</b>						
				<b>Lo</b>	<b>L25</b>	<b>L50</b>	<b>L100</b>	<b>L150</b>	<b>L200</b>	<b>L500</b>
				<b>0 (cm)</b>	<b>25 (cm)</b>	<b>50 (cm)</b>	<b>100 (cm)</b>	<b>150 (cm)</b>	<b>200 (cm)</b>	<b>500 (cm)</b>

25	25/Enero/18	1+160	21.5	0	0.02	0.04	0.05	0.07	0.04	0.12
26	25/Enero/18	1+200	21.5	0	0.04	0.08	0.09	0.10	0.06	0.20
27	25/Enero/18	1+240	22.0	0	0.03	0.04	0.06	0.08	0.04	0.20
28	25/Enero/18	1+280	22.0	0	0.03	0.04	0.07	0.08	0.05	0.21
29	25/Enero/18	1+320	22.0	0	0.03	0.04	0.06	0.08	0.04	0.23
30	25/Enero/18	1+360	22.0	0	0.03	0.06	0.07	0.10	0.05	0.21
31	25/Enero/18	1+400	22.0	0	0.04	0.08	0.09	0.10	0.06	0.23
32	25/Enero/18	1+440	22.0	0	0.03	0.05	0.07	0.08	0.05	0.21
33	25/Enero/18	1+480	22.5	0	0.04	0.07	0.08	0.09	0.05	0.17
34	25/Enero/18	1+520	22.5	0	0.02	0.04	0.04	0.08	0.03	0.15
35	25/Enero/18	1+560	23.0	0	0.03	0.06	0.07	0.08	0.05	0.17
36	25/Enero/18	1+600	23.0	0	0.03	0.06	0.07	0.09	0.05	0.21
37	25/Enero/18	1+640	23.0	0	0.04	0.08	0.10	0.13	0.07	0.24
38	25/Enero/18	1+680	23.0	0	0.03	0.04	0.06	0.08	0.04	0.15
39	25/Enero/18	1+720	23.0	0	0.02	0.04	0.05	0.07	0.04	0.08
40	25/Enero/18	1+760	23.0	0	0.04	0.08	0.10	0.12	0.07	0.21
41	25/Enero/18	1+800	23.0	0	0.05	0.06	0.12	0.13	0.08	0.24
42	25/Enero/18	1+840	23.5	0	0.02	0.05	0.05	0.07	0.04	0.12
43	25/Enero/18	1+880	23.5	0	0.03	0.04	0.07	0.08	0.05	0.21
44	25/Enero/18	1+920	23.5	0	0.03	0.04	0.07	0.10	0.05	0.21
45	25/Enero/18	1+960	23.5	0	0.04	0.08	0.09	0.11	0.06	0.20
46	25/Enero/18	2+000	24.0	0	0.03	0.06	0.07	0.09	0.05	0.21
47	25/Enero/18	2+040	24.0	0	0.02	0.04	0.04	0.06	0.03	0.24
48	25/Enero/18	2+080	24.0	0	0.03	0.04	0.06	0.08	0.04	0.20
49	25/Enero/18	2+120	24.0	0	0.04	0.06	0.08	0.09	0.05	0.20
50	25/Enero/18	2+160	24.0	0	0.02	0.05	0.05	0.07	0.04	0.12

Fuente: Elaboración propia

### 1) Determinación de deflexiones

El cálculo de las deflexiones se efectuó por diferencia de lecturas de dial, determinando la deflexión máxima ( $D_0$ ) y las deflexiones para 0; 0,25; 0,50; 1; 1,50; 2; y 5 m. respectivamente.

2) Las diferencias se multiplicaron, por un factor de corrección, que en este caso para la medición, la relación de brazos es de 1:1, por lo tanto el factor es 1.

### 3) Deflexiones corregidas

Una vez determinados los valores de deflexiones estos fueron corregidos previamente por temperatura y por estacionalidad, debido a la acción climática donde se realizan las mediciones de deflexión, siendo esta la más preponderante en cuanto a las variables ambientales que influyen en las propiedades físicas y mecánicas de los pavimentos:

$$D_{18} = \frac{D_t}{(k * (T^\circ - T^\circ_{amb}) * e + 1)}$$

Donde:

$D_{20}$ : Deflexión recuperable a la temperatura ambiente (para nuestro caso se tomó una temperatura ambiente de 20°C).

$D_t$ : Deflexión en mm.

$K$ : Coeficiente igual a 1/cm x °C.

$T$ : Temperatura del asfalto medida para cada ensayo.

$e$ : Espesor de la carpeta asfáltica en cm. (18 cm)

$$D_{18} = \frac{0.60 (0.01\text{mm})}{(1 * (35 - 20) * 0.018 \text{ mm} + 1)}$$

$$D_0 = 0.94 (0.01\text{mm})$$

Para la deflexión corregida por temperatura se tomó un Factor Estacional =1.

Los resultados de las deflexiones corregidas por temperatura y estacionalidad se muestran a continuación en las siguientes tablas para cada uno de los tramos.

### 3.3.3 Parámetros de evaluación de deflexiones corregidas

Pavimento rígido área urbana de la ciudad de Villamontes

Factor estacional: 1

Espesor: 18 cm

Tabla 3.43 Parámetros de evaluación corregidos por temperatura de Villamontes

Segm. N°	Progresiva	Temp. Pav. °C	Factor Correc. por Temp.	Parámetros de evaluación corregidos por temperatura a 20°C						
				D0	D25	D50	D100	D150	D200	D500
				0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm
1	42+200	35.0	0.787	0.60	0.52	0.46	0.00	0.00	0.48	0.48
2	42+240	36.0	0.776	0.24	0.10	0.14	0.10	0.06	0.02	0.00
3	42+280	36.0	0.776	0.28	0.18	0.16	0.08	0.04	0.02	0.00
4	42+320	36.0	0.776	0.26	0.22	0.08	0.05	0.04	0.02	0.00
5	42+360	36.0	0.776	0.18	0.10	0.06	0.02	0.04	0.02	0.00
6	42+400	36.5	0.771	0.24	0.18	0.14	0.12	0.10	0.06	0.00
7	42+440	36.5	0.771	0.20	0.18	0.06	0.06	0.04	0.02	0.00
8	42+480	36.5	0.771	0.26	0.12	0.08	0.04	0.00	0.02	0.08
9	42+520	37.0	0.766	0.30	0.28	0.22	0.10	0.08	0.04	0.00
10	42+560	37.0	0.766	0.20	0.12	0.10	0.08	0.06	0.04	0.00
11	42+600	37.0	0.766	0.22	0.12	0.10	0.06	0.04	0.02	0.00
12	42+640	37.0	0.766	0.20	0.16	0.12	0.10	0.08	0.04	0.00
13	42+680	37.0	0.766	0.24	0.22	0.10	0.08	0.06	0.02	0.00

14	42+720	37.0	0.766	0.20	0.12	0.08	0.06	0.06	0.04	0.00
15	42+760	37.5	0.760	0.24	0.21	0.14	0.12	0.04	0.04	0.00
16	42+800	37.5	0.760	0.18	0.10	0.10	0.06	0.02	0.00	0.06
17	42+840	37.5	0.760	0.22	0.08	0.10	0.06	0.04	0.02	0.00
18	42+880	37.5	0.760	0.26	0.20	0.08	0.06	0.04	0.02	0.00
19	42+920	37.5	0.760	0.22	0.21	0.08	0.06	0.04	0.02	0.00
20	42+960	37.5	0.760	0.36	0.22	0.28	0.22	0.14	0.12	0.00
21	43+000	38.0	0.755	0.20	0.10	0.10	0.08	0.06	0.04	0.00
22	43+040	38.0	0.755	0.24	0.18	0.10	0.08	0.08	0.04	0.00
23	43+080	38.0	0.755	0.20	0.08	0.08	0.06	0.04	0.02	0.00
24	43+120	38.0	0.755	0.24	0.23	0.10	0.08	0.04	0.02	0.00
25	42+200	38.0	0.755	0.18	0.04	0.08	0.06	0.02	0.00	0.00
26	43+200	37.5	0.760	0.30	0.20	0.12	0.10	0.08	0.04	0.00
Segm. Nº	Progresiva	Temp. Pav.°C	Factor Correc. por Temp.	Parámetros de evaluación corregidos por temperatura a 20°C						
				Do	D25	D50	D100	D150	D200	D500
				0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm
27	43+240	37.5	0.760	0.30	0.24	0.20	0.16	0.12	0.10	0.00
28	43+280	37.5	0.760	0.32	0.18	0.24	0.16	0.14	0.10	0.00
29	43+320	37.5	0.760	0.34	0.33	0.24	0.20	0.16	0.14	0.00
30	43+360	37.5	0.760	0.32	0.18	0.18	0.16	0.10	0.06	0.00
31	43+400	37.5	0.760	0.34	0.33	0.16	0.14	0.12	0.10	0.00
32	43+440	37.0	0.766	0.32	0.26	0.20	0.16	0.14	0.06	0.00
33	43+480	37.0	0.766	0.26	0.12	0.10	0.08	0.06	0.04	0.00
34	43+520	37.0	0.766	0.22	0.20	0.14	0.12	0.04	0.02	0.00

<b>35</b>	43+560	37.0	0.766	0.26	0.18	0.12	0.11	0.08	0.04	0.00
<b>36</b>	43+600	36.5	0.771	0.32	0.26	0.18	0.16	0.12	0.06	0.00
<b>37</b>	43+640	36.5	0.771	0.36	0.22	0.18	0.14	0.08	0.04	0.00
<b>38</b>	43+680	36.5	0.771	0.22	0.21	0.12	0.08	0.04	0.00	0.00
<b>39</b>	43+720	36.5	0.771	0.18	0.04	0.10	0.06	0.02	0.00	0.06
<b>40</b>	43+760	36.5	0.771	0.32	0.31	0.14	0.10	0.06	0.04	0.00
<b>41</b>	43+800	36.5	0.771	0.36	0.30	0.22	0.10	0.06	0.04	0.00
<b>42</b>	43+840	36.0	0.776	0.18	0.04	0.06	0.06	0.02	0.02	0.00
<b>43</b>	43+880	36.0	0.776	0.32	0.30	0.24	0.16	0.14	0.12	0.00
<b>44</b>	43+920	36.0	0.776	0.36	0.28	0.26	0.20	0.14	0.00	0.04
<b>45</b>	43+960	36.0	0.776	0.32	0.31	0.14	0.12	0.08	0.00	0.02
<b>46</b>	44+000	36.0	0.776	0.31	0.19	0.17	0.16	0.11	0.05	0.00
<b>47</b>	44+040	36.0	0.776	0.36	0.31	0.28	0.26	0.22	0.14	0.00
<b>48</b>	44+080	36.0	0.776	0.30	0.26	0.20	0.16	0.12	0.08	0.00
<b>49</b>	44+120	36.0	0.776	0.30	0.27	0.16	0.12	0.10	0.04	0.00
<b>50</b>	44+160	36.0	0.912	0.22	0.20	0.10	0.10	0.06	0.06	0.04

Fuente: Elaboración propia

Parámetros de evaluación de deflexiones corregidas

Pavimento rígido de la ciudad de Yacuiba

Factor estacional: 1

Espesor: 24 cm

Tabla 3.44 Parámetros de evaluación corregidos por temperatura de Yacuiba

Segm. Nº	Progresiva	Temp. Pav.°C	Factor Correc. por Temp.	Parámetros de evaluación corregidos por temperatura a 20°C						
				D0	D25	D50	D100	D150	D200	D500
				0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm
1	12+500	30.0	0.806	0.54	0.47	0.41	0.00	0.00	0.43	0.43
2	12+540	31.0	0.791	0.22	0.09	0.12	0.08	0.05	0.02	0.00
3	12+580	32.0	0.776	0.25	0.16	0.13	0.05	0.04	0.02	0.00
4	12+620	32.0	0.776	0.23	0.20	0.05	0.02	0.04	0.02	0.00
5	12+660	32.0	0.776	0.16	0.09	0.04	0.00	0.04	0.02	0.00
6	12+700	32.0	0.776	0.22	0.16	0.12	0.10	0.09	0.05	0.00
7	12+740	32.0	0.776	0.18	0.16	0.04	0.04	0.04	0.02	0.00
8	12+780	32.0	0.776	0.23	0.11	0.05	0.01	0.00	0.02	0.07
9	12+820	31.0	0.791	0.27	0.25	0.19	0.07	0.07	0.04	0.00
10	12+860	31.0	0.791	0.18	0.11	0.08	0.06	0.05	0.04	0.00
11	12+900	31.0	0.791	0.20	0.11	0.08	0.04	0.04	0.02	0.00
12	12+940	31.0	0.791	0.18	0.14	0.10	0.08	0.07	0.04	0.00
13	12+980	31.0	0.791	0.22	0.20	0.08	0.06	0.05	0.02	0.00
14	13+020	31.5	0.784	0.18	0.11	0.06	0.04	0.05	0.04	0.00
15	13+060	31.5	0.784	0.22	0.19	0.12	0.10	0.04	0.04	0.00
16	13+100	31.5	0.784	0.16	0.09	0.08	0.04	0.02	0.00	0.05
17	13+140	31.5	0.784	0.20	0.07	0.08	0.04	0.04	0.02	0.00
18	13+180	31.5	0.784	0.23	0.18	0.05	0.03	0.04	0.02	0.00
19	13+220	31.5	0.784	0.20	0.19	0.06	0.04	0.04	0.02	0.00
20	13+260	30.0	0.806	0.32	0.20	0.24	0.18	0.13	0.11	0.00
21	13+300	30.0	0.806	0.18	0.09	0.08	0.06	0.05	0.04	0.00

<b>22</b>	13+340	30.0	0.806	0.22	0.16	0.08	0.06	0.07	0.04	0.00
<b>23</b>	13+380	30.0	0.806	0.18	0.07	0.06	0.04	0.04	0.02	0.00
<b>24</b>	13+420	30.0	0.806	0.22	0.21	0.08	0.06	0.04	0.02	0.00
<b>25</b>	13+460	29.0	0.822	0.16	0.04	0.06	0.04	0.02	0.00	0.00
<b>26</b>	13+500	29.0	0.822	0.27	0.18	0.09	0.07	0.07	0.04	0.00
<b>Segm. Nº</b>	<b>Progresiva</b>	<b>Temp. Pav.°C</b>	<b>Factor Correc. por Temp.</b>	<b>Parámetros de evaluación corregidos por temperatura a 20°C</b>						
				<b>Do</b>	<b>D25</b>	<b>D50</b>	<b>D100</b>	<b>D150</b>	<b>D200</b>	<b>D500</b>
				<b>0.01 mm</b>	<b>0.01 mm</b>	<b>0.01 mm</b>	<b>0.01 mm</b>	<b>0.01 mm</b>	<b>0.01 mm</b>	<b>0.01 mm</b>
<b>27</b>	13+540	29.0	0.822	0.27	0.22	0.17	0.13	0.11	0.09	0.00
<b>28</b>	13+580	29.0	0.822	0.29	0.16	0.21	0.13	0.13	0.09	0.00
<b>29</b>	13+620	29.0	0.822	0.31	0.30	0.21	0.17	0.14	0.13	0.00
<b>30</b>	13+660	29.0	0.822	0.29	0.16	0.15	0.13	0.09	0.05	0.00
<b>31</b>	13+700	29.0	0.822	0.31	0.30	0.13	0.11	0.11	0.09	0.00
<b>32</b>	13+740	29.0	0.822	0.29	0.23	0.17	0.13	0.13	0.05	0.00
<b>33</b>	13+780	29.0	0.822	0.23	0.11	0.07	0.05	0.05	0.04	0.00
<b>34</b>	13+820	28.0	0.839	0.20	0.18	0.12	0.10	0.04	0.02	0.00
<b>35</b>	13+860	28.0	0.839	0.23	0.16	0.09	0.08	0.07	0.04	0.00
<b>36</b>	13+900	28.0	0.839	0.29	0.23	0.15	0.13	0.11	0.05	0.00
<b>37</b>	13+940	28.0	0.839	0.32	0.20	0.14	0.10	0.07	0.04	0.00
<b>38</b>	13+980	28.0	0.839	0.20	0.19	0.10	0.06	0.04	0.00	0.00
<b>39</b>	14+020	28.0	0.839	0.16	0.04	0.08	0.04	0.02	0.00	0.05
<b>40</b>	14+060	28.0	0.839	0.29	0.28	0.11	0.07	0.05	0.04	0.00
<b>41</b>	14+100	28.0	0.839	0.32	0.27	0.18	0.06	0.05	0.04	0.00
<b>42</b>	14+140	28.0	0.839	0.16	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.00

<b>43</b>	14+180	28.0	0.839	0.29	0.27	0.21	0.13	0.13	0.11	0.00
<b>44</b>	14+220	27.0	0.856	0.32	0.25	0.22	0.16	0.13	0.00	0.04
<b>45</b>	14+260	27.0	0.856	0.29	0.28	0.11	0.09	0.07	0.00	0.02
<b>46</b>	14+300	27.0	0.856	0.28	0.17	0.14	0.13	0.10	0.05	0.00
<b>47</b>	14+340	27.0	0.856	0.32	0.28	0.24	0.22	0.20	0.13	0.00
<b>48</b>	14+380	27.0	0.856	0.27	0.23	0.17	0.13	0.11	0.07	0.00
<b>49</b>	14+420	27.0	0.856	0.27	0.24	0.13	0.09	0.09	0.04	0.00
<b>50</b>	14+460	27.0	0.856	0.20	0.18	0.08	0.08	0.05	0.05	0.04

Fuente: Elaboración propia

Parámetros de evaluación de deflexiones corregidas

Pavimento rígido de la población de Entre Ríos

Factor estacional: 1

Espesor: 15 cm

Tabla 3.45 Parámetros de evaluación corregidos por temperatura de Entre Ríos

Segm. N°	Progresiva	Temp. Pav.°C	Factor Correc. por Temp.	Parámetros de evaluación corregidos por temperatura a 20°C						
				D0	D25	D50	D100	D150	D200	D500
				0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm
<b>1</b>	0+320	19.0	1.015	0.65	0.51	0.41	0.00	0.00	0.44	0.44
<b>2</b>	0+360	19.0	1.015	0.41	0.17	0.24	0.17	0.10	0.03	0.00



		<b>Temp. Pav.°C</b>	<b>Temp.</b>	<b>mm</b>						
<b>27</b>	2+780	22.0	0.971	0.51	0.41	0.34	0.27	0.20	0.17	0.00
<b>28</b>	2+820	23.5	0.950	0.54	0.31	0.41	0.27	0.24	0.17	0.00
<b>29</b>	2+860	23.5	0.950	0.58	0.56	0.41	0.34	0.27	0.24	0.00
<b>30</b>	2+900	23.0	0.957	0.54	0.31	0.31	0.27	0.17	0.10	0.00
<b>31</b>	2+940	23.0	0.957	0.58	0.56	0.27	0.24	0.20	0.17	0.00
<b>32</b>	2+980	22.5	0.964	0.54	0.44	0.34	0.27	0.24	0.10	0.00
<b>33</b>	3+020	22.5	0.964	0.44	0.20	0.17	0.14	0.10	0.07	0.00
<b>34</b>	3+060	22.5	0.964	0.37	0.34	0.24	0.20	0.07	0.03	0.00
<b>35</b>	3+100	22.0	0.971	0.44	0.31	0.20	0.19	0.14	0.07	0.00
<b>36</b>	3+140	22.0	0.971	0.54	0.44	0.31	0.27	0.20	0.10	0.00
<b>37</b>	3+180	22.0	0.971	0.61	0.37	0.31	0.24	0.14	0.07	0.00
<b>38</b>	3+220	19.5	1.008	0.37	0.36	0.20	0.14	0.07	0.00	0.00
<b>39</b>	3+260	19.5	1.008	0.31	0.07	0.17	0.10	0.03	0.00	0.10
<b>40</b>	3+300	19.5	1.008	0.54	0.53	0.24	0.17	0.10	0.07	0.00
<b>41</b>	3+340	19.0	1.015	0.61	0.51	0.37	0.17	0.10	0.07	0.00
<b>42</b>	3+380	19.0	1.015	0.31	0.07	0.10	0.10	0.03	0.03	0.00
<b>43</b>	3+420	18.5	1.023	0.54	0.51	0.41	0.27	0.24	0.20	0.00
<b>44</b>	3+460	18.5	1.023	0.61	0.48	0.44	0.34	0.24	0.00	0.07
<b>45</b>	3+500	17.0	1.047	0.54	0.53	0.24	0.20	0.14	0.00	0.03
<b>46</b>	3+540	17.0	1.047	0.53	0.32	0.29	0.27	0.19	0.09	0.00
<b>47</b>	3+580	16.5	1.055	0.61	0.53	0.48	0.44	0.37	0.24	0.00
<b>48</b>	3+620	16.5	1.055	0.51	0.44	0.34	0.27	0.20	0.14	0.00
<b>49</b>	3+660	16.5	1.055	0.51	0.46	0.27	0.20	0.17	0.07	0.00
<b>50</b>	3+700	16.5	1.055	0.37	0.34	0.17	0.17	0.10	0.10	0.07

Fuente: Elaboración propia

Parámetros de evaluación de deflexiones corregidas

Pavimento rígido nueva terminal de la ciudad de Tarija

Factor Estacional: 1

Espesor: 20 cm

Tabla 3.46 Parámetros de evaluación corregidos por temperatura de Tarija

Segm. Nº	Progresiva	Temp. Pav.°C	Factor Correc. por Temp.	Parámetros de evaluación corregidos por temperatura a 20°C						
				D0	D25	D50	D100	D150	D200	D500
				0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm
1	0+200	19.0	1.02	0.16	0.14	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0+240	19.0	1.02	0.24	0.20	0.16	0.10	0.02	0.00	0.00
3	0+280	19.0	1.02	0.16	0.10	0.08	0.04	0.00	0.06	0.05
4	0+320	19.0	1.02	0.16	0.12	0.06	0.00	0.06	0.08	0.04
5	0+360	19.5	1.01	0.12	0.09	0.07	0.05	0.06	0.07	0.00
6	0+400	19.5	1.01	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10	0.12	0.00
7	0+440	19.5	1.01	0.13	0.11	0.07	0.07	0.06	0.09	0.00
8	0+480	20.0	1.00	0.12	0.08	0.04	0.02	0.00	0.05	0.00
9	0+520	20.0	1.00	0.20	0.16	0.17	0.11	0.10	0.14	0.00
10	0+560	20.0	1.00	0.13	0.11	0.09	0.08	0.07	0.10	0.00
11	0+600	20.0	1.00	0.15	0.12	0.09	0.08	0.07	0.10	0.00
12	0+640	20.0	1.00	0.13	0.11	0.10	0.09	0.08	0.10	0.00

13	0+680	20.0	1.00	0.16	0.13	0.10	0.09	0.08	0.11	0.00
14	0+720	20.0	1.00	0.13	0.11	0.08	0.07	0.07	0.09	0.00
15	0+760	20.5	0.99	0.16	0.14	0.12	0.11	0.07	0.12	0.00
16	0+800	20.5	0.99	0.08	0.06	0.04	0.03	0.01	0.04	0.00
17	0+840	20.5	0.99	0.15	0.12	0.09	0.08	0.07	0.10	0.00
18	0+880	20.5	0.99	0.17	0.13	0.09	0.08	0.08	0.11	0.00
19	0+920	21.0	0.98	0.15	0.12	0.08	0.08	0.07	0.10	0.00
20	0+960	21.0	0.98	0.24	0.21	0.21	0.18	0.14	0.20	0.00
21	1+000	21.0	0.98	0.13	0.11	0.09	0.08	0.07	0.10	0.00
22	1+040	21.0	0.98	0.16	0.13	0.10	0.09	0.09	0.11	0.00
23	1+080	21.0	0.98	0.13	0.11	0.08	0.07	0.06	0.09	0.00
24	1+120	21.5	0.97	0.16	0.13	0.10	0.09	0.07	0.11	0.00
25	1+160	21.5	0.97	0.12	0.10	0.08	0.07	0.05	0.08	0.00
26	1+200	21.5	0.97	0.20	0.16	0.12	0.11	0.10	0.14	0.00
Segm. N°	Progresiva	Temp. Pav.°C	Factor	Parámetros de evaluación corregidos por temperatura a 20°c						
			Correc. por Temp.	D0	D25	D50	D100	D150	D200	D500
				0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm
27	1+240	22.0	0.96	0.20	0.17	0.16	0.14	0.12	0.16	0.00
28	1+280	22.0	0.96	0.21	0.18	0.18	0.14	0.13	0.17	0.00
29	1+320	22.0	0.96	0.23	0.20	0.18	0.16	0.15	0.19	0.00
30	1+360	22.0	0.96	0.21	0.18	0.15	0.14	0.12	0.17	0.00
31	1+400	22.0	0.96	0.23	0.19	0.15	0.14	0.13	0.17	0.00
32	1+440	22.0	0.96	0.21	0.18	0.16	0.14	0.13	0.17	0.00
33	1+480	22.5	0.95	0.17	0.14	0.10	0.09	0.08	0.12	0.00

34	1+520	22.5	0.95	0.15	0.13	0.11	0.10	0.07	0.12	0.00
35	1+560	23.0	0.94	0.17	0.14	0.11	0.11	0.09	0.13	0.00
36	1+600	23.0	0.94	0.21	0.18	0.15	0.14	0.12	0.17	0.00
37	1+640	23.0	0.94	0.24	0.20	0.16	0.14	0.12	0.18	0.00
38	1+680	23.0	0.94	0.15	0.12	0.10	0.08	0.07	0.11	0.00
39	1+720	23.0	0.94	0.08	0.06	0.04	0.03	0.01	0.04	0.00
40	1+760	23.0	0.94	0.21	0.17	0.13	0.12	0.10	0.15	0.00
41	1+800	23.0	0.94	0.24	0.19	0.18	0.12	0.11	0.16	0.00
42	1+840	23.5	0.93	0.12	0.10	0.07	0.07	0.05	0.08	0.00
43	1+880	23.5	0.93	0.21	0.18	0.18	0.14	0.13	0.17	0.00
44	1+920	23.5	0.93	0.21	0.18	0.17	0.14	0.11	0.16	0.00
45	1+960	23.5	0.93	0.20	0.16	0.12	0.11	0.09	0.14	0.00
46	2+000	24.0	0.93	0.21	0.18	0.14	0.14	0.12	0.16	0.00
47	2+040	24.0	0.93	0.24	0.22	0.21	0.20	0.18	0.21	0.00
48	2+080	24.0	0.93	0.20	0.17	0.16	0.14	0.12	0.16	0.00
49	2+120	24.0	0.93	0.20	0.16	0.14	0.12	0.11	0.15	0.00
50	2+160	24.0	0.93	0.12	0.10	0.07	0.07	0.05	0.08	0.00

Fuente: Elaboración propia

#### 1) Determinación del radio de curvatura

El Radio de curvatura se determinó con la siguiente ecuación y con la ayuda de una deflexión auxiliar a 25 cm del eje de máxima deformación:

$$R_c = \frac{6250}{2 * (D_o - D_{25})}$$

Donde:

Rc: Radio de curvatura

Do: Deflexión máxima corregida.

Do: Deflexión a una distancia de 25 cm del eje corregida.

$$Rc = \frac{3125}{(0.94 - 0.82)}$$

$$Rc = 24805 \text{ m}$$

### 1) Determinación de la deflexión característica

Para determinar la deflexión característica se tomará la base de datos de deflexiones máximas de cada una de las secciones:

$$Dc = Dp + t * \sigma$$

Donde:

Dc: Deflexión característica

Dp: Deflexión promedio de los valores individuales Do corregidos

$\sigma$ : Desviación estándar.

t: Coeficiente que representa el porcentaje de área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la deflexión característica Dc. = 1,645

$$Dc = 0.42 \text{ mm} + 1.645 * 0.12$$

$$Dc = 0.61 \text{ (0.01 mm)}$$

### 2) Determinación de la deflexión admisible

La deflexión admisible de diseño que fue proporcionada por la ABC es de 70 (0.01mm).

Los resultados de las deflexiones se muestran a continuación para cada uno de los tramos.

## 3.3.4 Resultados de las deflexiones

Pavimento rígido de la ciudad de Villamontes

Tabla 3.47 Radios de curvatura de la ciudad de Villamontes

Segm. N°	Progresiva	Lecturas de campo			Parámetros de evaluación		
		Lo	L25	L500	Do	D25	Rc
		0 (cm)	25 (cm)	500 (cm)	0.01 (mm)	0.01 (mm)	m
1	42+200	0	0.08	0.12	0.94	0.82	24805
2	42+240	0	0.14	0.24	0.37	0.16	14375
3	42+280	0	0.10	0.28	0.43	0.28	20125
4	42+320	0	0.04	0.26	0.40	0.34	50313
5	42+360	0	0.08	0.18	0.28	0.16	25156
6	42+400	0	0.06	0.24	0.37	0.28	33776
7	42+440	0	0.02	0.20	0.31	0.28	101328
8	42+480	0	0.14	0.18	0.40	0.19	14475
9	42+520	0	0.02	0.30	0.46	0.43	102031
10	42+560	0	0.08	0.20	0.31	0.18	25508
11	42+600	0	0.10	0.22	0.34	0.18	20406
12	42+640	0	0.04	0.20	0.31	0.25	51016
13	42+680	0	0.02	0.24	0.37	0.34	102031
14	42+720	0	0.08	0.20	0.31	0.18	25508
15	42+760	0	0.03	0.24	0.37	0.32	68490
16	42+800	0	0.08	0.12	0.27	0.15	25684
17	42+840	0	0.14	0.22	0.33	0.12	14676
18	42+880	0	0.06	0.26	0.40	0.30	34245
19	42+920	0	0.01	0.22	0.33	0.32	205469

<b>20</b>	42+960	0	0.14	0.36	0.55	0.33	14676
<b>21</b>	43+000	0	0.10	0.20	0.30	0.15	20688
<b>Segm. Nº</b>	<b>Progresiva</b>	<b>Lecturas de campo</b>			<b>Parámetros de evaluación</b>		
		<b>Lo</b>	<b>L25</b>	<b>L500</b>	<b>Do</b>	<b>D25</b>	<b>Rc</b>
		<b>0 (cm)</b>	<b>25 (cm)</b>	<b>500 (cm)</b>	<b>0.01 (mm)</b>	<b>0.01 (mm)</b>	<b>m</b>
<b>22</b>	43+040	0	0.06	0.24	0.36	0.27	34479
<b>23</b>	43+080	0	0.12	0.20	0.30	0.12	17240
<b>24</b>	43+120	0	0.01	0.24	0.36	0.35	206875
<b>25</b>	43+160	0	0.14	0.18	0.27	0.06	14777
<b>26</b>	43+200	0	0.10	0.30	0.46	0.30	20547
<b>27</b>	43+240	0	0.06	0.30	0.46	0.37	34245
<b>28</b>	43+280	0	0.14	0.32	0.49	0.27	14676
<b>29</b>	43+320	0	0.01	0.34	0.52	0.50	205469
<b>30</b>	43+360	0	0.14	0.32	0.49	0.27	14676
<b>31</b>	43+400	0	0.01	0.34	0.52	0.50	205469
<b>32</b>	43+440	0	0.06	0.32	0.49	0.40	34010
<b>33</b>	43+480	0	0.14	0.26	0.40	0.18	14576
<b>34</b>	43+520	0	0.02	0.22	0.34	0.31	102031
<b>35</b>	43+560	0	0.08	0.26	0.40	0.28	25508
<b>36</b>	43+600	0	0.06	0.32	0.49	0.40	33776
<b>37</b>	43+640	0	0.14	0.36	0.56	0.34	14475
<b>38</b>	43+680	0	0.01	0.22	0.34	0.32	202656
<b>39</b>	43+720	0	0.14	0.12	0.28	0.06	14475
<b>40</b>	43+760	0	0.01	0.32	0.49	0.48	202656
<b>41</b>	43+800	0	0.06	0.36	0.56	0.46	33776
<b>42</b>	43+840	0	0.14	0.18	0.28	0.06	14375

43	43+880	0	0.02	0.32	0.50	0.47	100625
44	43+920	0	0.08	0.32	0.56	0.43	25156
45	43+960	0	0.01	0.30	0.50	0.48	201250
46	44+000	0	0.12	0.31	0.48	0.30	16771
47	44+040	0	0.05	0.36	0.56	0.48	40250
48	44+080	0	0.04	0.30	0.47	0.40	50313
49	44+120	0	0.03	0.30	0.47	0.42	67083
50	44+160	0	0.02	0.18	0.40	0.36	85625

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.47.1 Deflexión característica de la ciudad de Villamontes

<b>Determinación de la deflexión característica</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Deflexión 1/100 mm</b>		<b>Radio curvatura m</b>
	<b>Do</b>	<b>D25</b>	
<b>Número de datos</b>	50	50	50
<b>Promedios (Do)</b>	0.42	0.31	60852
<b>Desviación estándar (Do)</b>	0.12	0.14	
<b>Deflexión característica (Dc)</b>	0.61		
<b>Deflexión admisible (Da)</b>	0.70		

Fuente:

Elaboración propia

Gráfico 3.16 Deflectograma para la ciudad de Villamontes



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la gráfica resumen generada en el deflectograma, se puede observar que las deflexiones generadas en los pavimentos rígidos son mínimas y casi imperceptibles y que los valores no superan al valor de la deflexión admisible, esto se debe a que los pavimentos rígidos poseen alta resistencia en su capa de rodadura.

### 3.3.4 Resultados de las deflexiones

Pavimento rígido de la ciudad de Yacuiba

Tabla 3.48 Radios de curvatura de la ciudad de Yacuiba

Segm. Nº	Progresiva	Lecturas de campo			Parámetros de evaluación		
		Lo	L25	L500	Do	D25	Rc
		0 (cm)	25 (cm)	500 (cm)	0.01 (mm)	0.01 (mm)	m
1	12+500	0	0.07	0.11	0.87	0.75	26910
2	12+540	0	0.13	0.22	0.34	0.14	15675
3	12+580	0	0.09	0.25	0.39	0.25	22361
4	12+620	0	0.04	0.23	0.36	0.31	55903
5	12+660	0	0.07	0.16	0.25	0.14	27951

6	12+700	0	0.05	0.22	0.34	0.25	37269
7	12+740	0	0.02	0.18	0.28	0.25	111806
8	12+780	0	0.13	0.16	0.36	0.17	15972
9	12+820	0	0.02	0.27	0.43	0.40	109722
10	12+860	0	0.07	0.18	0.28	0.17	27431
11	12+900	0	0.09	0.20	0.31	0.17	21944
12	12+940	0	0.04	0.18	0.28	0.23	54861
13	12+980	0	0.02	0.22	0.34	0.31	109722
14	13+020	0	0.07	0.18	0.28	0.17	27691
15	13+060	0	0.03	0.22	0.34	0.30	73843
16	13+100	0	0.07	0.11	0.25	0.14	27691
17	13+140	0	0.13	0.20	0.31	0.11	15823
18	13+180	0	0.05	0.23	0.37	0.28	36921
19	13+220	0	0.01	0.20	0.31	0.30	221528
20	13+260	0	0.13	0.32	0.52	0.32	15377
21	13+300	0	0.09	0.18	0.29	0.15	21528
22	13+340	0	0.05	0.22	0.35	0.26	35880
23	13+380	0	0.11	0.18	0.29	0.12	17940
24	13+420	0	0.01	0.22	0.35	0.33	215278
25	13+460	0	0.13	0.16	0.27	0.06	15079
26	13+500	0	0.09	0.27	0.44	0.30	21111
27	13+540	0	0.05	0.27	0.44	0.36	35185
<b>Segm. Nº</b>	<b>Progresiva</b>	<b>Lecturas de campo</b>			<b>Parámetros de evaluación</b>		
		<b>Lo</b>	<b>L25</b>	<b>L500</b>	<b>Do</b>	<b>D25</b>	<b>Rc</b>
		<b>0 (cm)</b>	<b>25 (cm)</b>	<b>500 (cm)</b>	<b>0.01 (mm)</b>	<b>0.01 (mm)</b>	<b>m</b>
28	13+580	0	0.13	0.29	0.47	0.27	15079

<b>29</b>	13+620	0	0.01	0.31	0.50	0.49	211111
<b>30</b>	13+660	0	0.13	0.29	0.47	0.27	15079
<b>31</b>	13+700	0	0.01	0.31	0.50	0.49	211111
<b>32</b>	13+740	0	0.05	0.29	0.47	0.38	35185
<b>33</b>	13+780	0	0.13	0.23	0.38	0.18	15079
<b>34</b>	13+820	0	0.02	0.20	0.33	0.30	103472
<b>35</b>	13+860	0	0.07	0.23	0.39	0.27	25868
<b>36</b>	13+900	0	0.05	0.29	0.48	0.39	34491
<b>37</b>	13+940	0	0.13	0.32	0.54	0.33	14782
<b>38</b>	13+980	0	0.01	0.20	0.33	0.32	206944
<b>39</b>	14+020	0	0.13	0.11	0.27	0.06	14782
<b>40</b>	14+060	0	0.01	0.29	0.48	0.47	206944
<b>41</b>	14+100	0	0.05	0.32	0.54	0.45	34491
<b>42</b>	14+140	0	0.13	0.16	0.27	0.06	14782
<b>43</b>	14+180	0	0.02	0.29	0.48	0.45	103472
<b>44</b>	14+220	0	0.07	0.29	0.55	0.43	25347
<b>45</b>	14+260	0	0.01	0.27	0.49	0.48	202778
<b>46</b>	14+300	0	0.11	0.28	0.48	0.29	16898
<b>47</b>	14+340	0	0.05	0.32	0.55	0.48	40556
<b>48</b>	14+380	0	0.04	0.27	0.46	0.40	50694
<b>49</b>	14+420	0	0.03	0.27	0.46	0.42	67593
<b>50</b>	14+460	0	0.02	0.16	0.34	0.31	101389

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.48.1 Deflexión característica de la ciudad de Yacuiba

<b>Determinación de la deflexión característica</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Deflexión 1/100 mm</b>		<b>Radio curvatura m</b>
	<b>Do</b>	<b>D25</b>	
<b>Número de datos</b>	50	50	50
<b>Promedios (Do)</b>	0.40	0.29	63727
<b>Desviación estándar (Do)</b>	0.11	0.14	
<b>Deflexión característica (Dc)</b>	0.59		
<b>Deflexión admisible (Da)</b>	0.70		

Fuente:

Elaboración propia

Gráfico 3.17 Deflectograma para la ciudad de Yacuiba



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la gráfica resumen generada en el deflectograma, se puede observar que las deflexiones generadas en los pavimentos rígidos son mínimas y casi imperceptibles y que los valores no superan al valor de la deflexión admisible, esto se debe a que los pavimentos rígidos poseen alta resistencia en su capa de rodadura.

#### Resultados de las deflexiones

#### Pavimento rígido de la población de Entre Ríos

Tabla 3.49 Radios de curvatura de la población de Entre Ríos

Segm. Nº	Progresiva	Lecturas de campo			Parámetros de evaluación		
		Lo	L25	L500	Do	D25	Rc
		0 (cm)	25 (cm)	500 (cm)	0.01 (mm)	0.01 (mm)	m
1	0+320	0	0.14	0.20	1.31	1.04	11317
2	0+360	0	0.24	0.41	0.83	0.35	6467
3	0+400	0	0.17	0.48	0.97	0.62	9053
4	0+440	0	0.07	0.44	0.90	0.76	22633
5	0+480	0	0.14	0.31	0.62	0.35	11317
6	0+520	0	0.10	0.41	0.83	0.62	15089
7	0+560	0	0.03	0.34	0.69	0.62	45611
8	0+600	0	0.24	0.31	0.89	0.41	6516
9	2+060	0	0.03	0.51	1.03	0.96	45611
10	2+100	0	0.14	0.34	0.69	0.41	11403
11	2+140	0	0.17	0.37	0.75	0.41	9122
12	2+180	0	0.07	0.34	0.69	0.55	22806
13	2+220	0	0.03	0.41	0.82	0.75	45956
14	2+260	0	0.14	0.34	0.68	0.41	11489
15	2+300	0	0.05	0.41	0.82	0.71	30637

16	2+340	0	0.14	0.20	0.61	0.34	11489
17	2+380	0	0.24	0.37	0.73	0.27	6713
18	2+420	0	0.10	0.44	0.86	0.67	15663
19	2+460	0	0.02	0.37	0.73	0.70	93980
20	2+500	0	0.24	0.61	1.20	0.73	6713
21	2+540	0	0.17	0.34	0.66	0.33	9467
22	2+580	0	0.10	0.41	0.79	0.59	15778
23	2+620	0	0.20	0.34	0.66	0.26	7889
24	2+660	0	0.02	0.41	0.79	0.76	94669
25	2+700	0	0.24	0.31	0.59	0.13	6762
26	2+740	0	0.17	0.51	0.99	0.66	9467
27	2+780	0	0.10	0.51	0.99	0.79	15778
<b>Segm. Nº</b>	<b>Progresiva</b>	<b>Lecturas de campo</b>			<b>Parámetros de evaluación</b>		
		<b>Lo</b>	<b>L25</b>	<b>L500</b>	<b>Do</b>	<b>D25</b>	<b>Rc</b>
		<b>0 (cm)</b>	<b>25 (cm)</b>	<b>500 (cm)</b>	<b>0.01 (mm)</b>	<b>0.01 (mm)</b>	<b>m</b>
28	2+820	0	0.24	0.54	1.03	0.58	6910
29	2+860	0	0.02	0.58	1.10	1.07	96737
30	2+900	0	0.24	0.54	1.04	0.59	6861
31	2+940	0	0.02	0.58	1.11	1.07	96048
32	2+980	0	0.10	0.54	1.05	0.85	15893
33	3+020	0	0.24	0.44	0.85	0.39	6811
34	3+060	0	0.03	0.37	0.72	0.66	47679
35	3+100	0	0.14	0.44	0.86	0.59	11834
36	3+140	0	0.10	0.54	1.06	0.86	15778
37	3+180	0	0.24	0.61	1.19	0.73	6762
38	3+220	0	0.02	0.37	0.75	0.72	91222

<b>39</b>	3+260	0	0.24	0.20	0.62	0.14	6516
<b>40</b>	3+300	0	0.02	0.54	1.10	1.06	91222
<b>41</b>	3+340	0	0.10	0.61	1.24	1.04	15089
<b>42</b>	3+380	0	0.24	0.31	0.62	0.14	6467
<b>43</b>	3+420	0	0.03	0.54	1.11	1.04	44922
<b>44</b>	3+460	0	0.14	0.54	1.25	0.97	11230
<b>45</b>	3+500	0	0.02	0.51	1.14	1.10	87776
<b>46</b>	3+540	0	0.20	0.53	1.10	0.68	7315
<b>47</b>	3+580	0	0.09	0.61	1.29	1.11	17417
<b>48</b>	3+620	0	0.07	0.51	1.08	0.93	21772
<b>49</b>	3+660	0	0.05	0.51	1.08	0.97	29029
<b>50</b>	3+700	0	0.03	0.31	0.79	0.72	43543

Fuente: Elaboración propia

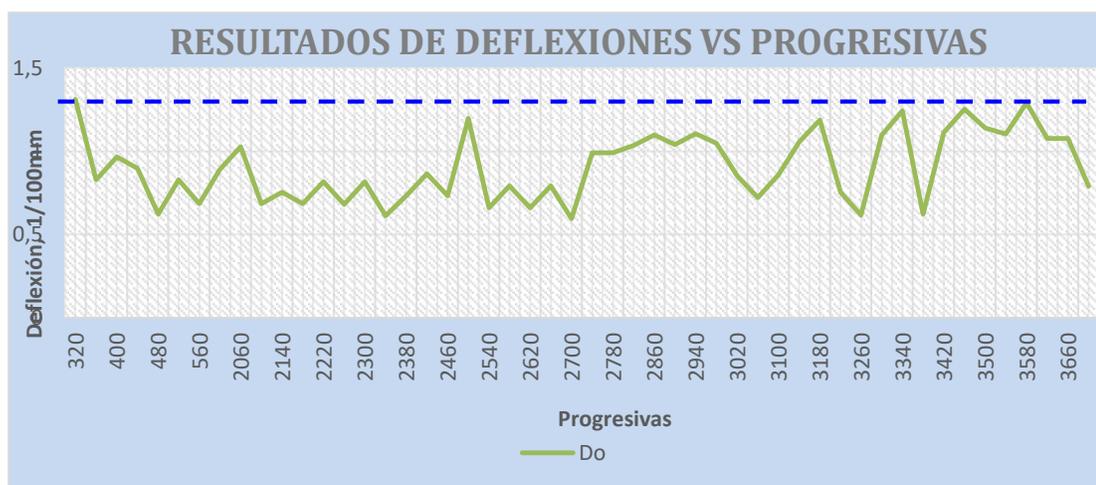
Tabla 3.49.1 Deflexión característica de la población de Entre Ríos

<b>Determinación de la deflexión característica</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Deflexión 1/100 mm</b>		<b>Radio curvatura m</b>
	<b>Do</b>	<b>D25</b>	
<b>Número de datos</b>	50	50	50
<b>Promedios (Do)</b>	0.91	0.66	27685

<b>Desviación estándar (Do)</b>	0.21	0.28	
<b>Deflexión característica (Dc)</b>	1.25		
<b>Deflexión admisible (Da)</b>	0.70		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.18 Deflectograma para la población de Entre Ríos



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la gráfica resumen generada en el deflectograma, se puede observar que las deflexiones generadas en los pavimentos rígidos son mínimas y casi imperceptibles y que los valores no superan al valor de la deflexión admisible, esto se debe a que los pavimentos rígidos poseen alta resistencia en su capa de rodadura.

En esta última grafica del deflectograma para la ciudad de Entre Ríos se puede observar que las deflexiones son mayores en la capa de rodadura de este pavimento debido al espesor menor de la losa con relación a de las dos anteriores ciudades.

Resultados de las deflexiones

## Pavimento rígido nueva terminal de la ciudad de Tarija

Tabla 3.50 Radios de curvatura de la ciudad de Tarija

Segm. Nº	Progresiva	Lecturas de campo			Parámetros de evaluación		
		Lo	L25	L500	Do	D25	Rc
		0 (cm)	25 (cm)	500 (cm)	0.01 (mm)	0.01 (mm)	m
1	0+200	0	0.02	0.16	0.33	0.29	76563
2	0+240	0	0.04	0.24	0.49	0.41	38281
3	0+280	0	0.06	0.11	0.33	0.20	25521
4	0+320	0	0.04	0.12	0.33	0.24	38281
5	0+360	0	0.03	0.12	0.24	0.18	47977
6	0+400	0	0.02	0.16	0.32	0.28	63970
7	0+440	0	0.03	0.13	0.27	0.21	54831
8	0+480	0	0.04	0.12	0.24	0.15	35245
9	0+520	0	0.04	0.20	0.40	0.32	38770
10	0+560	0	0.02	0.13	0.27	0.22	64616
11	0+600	0	0.03	0.15	0.29	0.23	48462
12	0+640	0	0.02	0.13	0.27	0.23	77539
13	0+680	0	0.03	0.16	0.32	0.26	48462
14	0+720	0	0.03	0.13	0.27	0.21	55385
15	0+760	0	0.02	0.16	0.32	0.27	65262
16	0+800	0	0.02	0.08	0.16	0.11	65262
17	0+840	0	0.03	0.15	0.29	0.23	48947
18	0+880	0	0.04	0.17	0.34	0.27	39157
19	0+920	0	0.03	0.15	0.29	0.23	49431
20	0+960	0	0.03	0.24	0.47	0.42	56493
21	1+000	0	0.02	0.13	0.26	0.22	65908

22	1+040	0	0.03	0.16	0.32	0.25	49431
23	1+080	0	0.03	0.13	0.26	0.21	56493
24	1+120	0	0.03	0.16	0.31	0.25	49916
25	1+160	0	0.02	0.12	0.23	0.19	66554
26	1+200	0	0.04	0.20	0.39	0.31	39933
27	1+240	0	0.03	0.20	0.39	0.33	57600
<b>Segm. Nº</b>	<b>Progresiva</b>	<b>Lecturas de campo</b>			<b>Parámetros de evaluación</b>		
		<b>Lo</b>	<b>L25</b>	<b>L500</b>	<b>Do</b>	<b>D25</b>	<b>Rc</b>
		<b>0 (cm)</b>	<b>25 (cm)</b>	<b>500 (cm)</b>	<b>0.01 (mm)</b>	<b>0.01 (mm)</b>	<b>m</b>
28	1+280	0	0.03	0.20	0.41	0.35	50400
29	1+320	0	0.03	0.21	0.44	0.38	57600
30	1+360	0	0.03	0.23	0.41	0.35	50400
31	1+400	0	0.04	0.21	0.44	0.36	40320
32	1+440	0	0.03	0.23	0.41	0.35	50400
33	1+480	0	0.04	0.21	0.33	0.26	45231
34	1+520	0	0.02	0.17	0.28	0.24	81416
35	1+560	0	0.03	0.15	0.33	0.27	54794
36	1+600	0	0.03	0.17	0.40	0.34	51370
37	1+640	0	0.04	0.21	0.46	0.37	37360
38	1+680	0	0.03	0.24	0.28	0.22	58708
39	1+720	0	0.02	0.15	0.15	0.11	68493
40	1+760	0	0.04	0.08	0.40	0.32	37360
41	1+800	0	0.05	0.21	0.46	0.36	31612
42	1+840	0	0.02	0.24	0.23	0.18	69139
43	1+880	0	0.03	0.12	0.40	0.34	51854
44	1+920	0	0.03	0.21	0.39	0.33	51854

45	1+960	0	0.04	0.21	0.37	0.30	41483
46	2+000	0	0.03	0.20	0.38	0.33	55828
47	2+040	0	0.02	0.21	0.45	0.41	83742
48	2+080	0	0.03	0.24	0.37	0.32	59816
49	2+120	0	0.04	0.20	0.37	0.31	46523
50	2+160	0	0.02	0.20	0.22	0.18	69785

Fuente: Elaboración propia

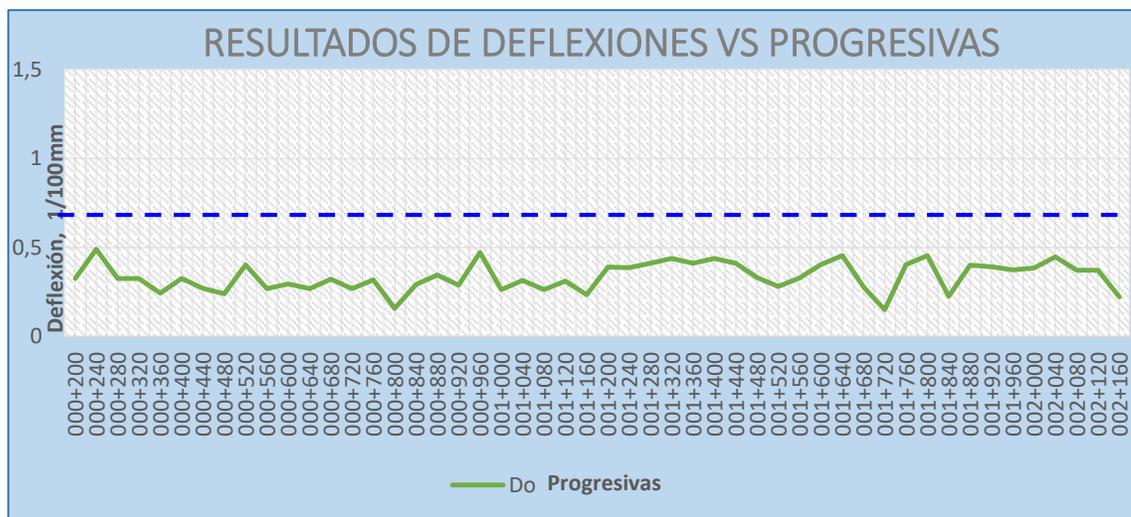
Tabla 3.50.1 Deflexión característica de la ciudad de Tarija

<b>Determinación de la deflexión característica</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Deflexión 1/100 mm</b>		<b>Radio curvatura m</b>
	<b>Do</b>	<b>D25</b>	
<b>Número de datos</b>	50	50	50
<b>Promedios (Do)</b>	0.34	0.27	53396
<b>Desviación estándar (Do)</b>	0.08	0.08	
<b>Deflexión característica (Dc)</b>	0.47		
<b>Deflexión admisible (Da)</b>	0.70		

Fuente:

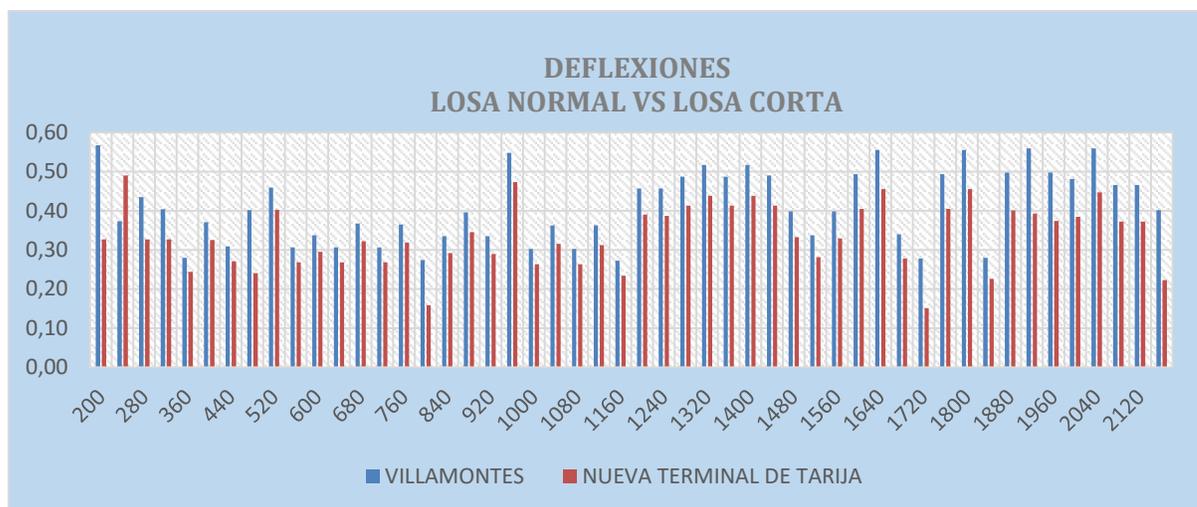
Elaboración propia

Gráfico 3.19 Deflectograma para la ciudad de Tarija



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.20 Deflexiones losa tradicional vs losa corta



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica comparativa de las deflexiones, se puede observar que los valores de las deflexiones que se producen en el pavimento rígido con losas cortas ( Nueva terminal de Tarija), son menores que las deflexiones que se originan en un pavimento rígido tradicional (Villamontes), esto es debido a diversos factores entre los cuales tenemos; que al disminuir las dimensiones de las losas tradicionales por dimensiones menores, las losas presentan una mejor distribución de las cargas aplicadas sobre su estructura; además influye en los resultados que el pavimento de la nueva terminal de Tarija presenta menores años de servicio que el pavimento de la ciudad de Villamontes.

Tabla 3.51 Resumen de deflexiones características

<b>Determinación de la deflexión característica</b>						
<b>Parámetros</b>	<b>Villamontes</b>		<b>Radio curvatura m</b>	<b>Tarija</b>		<b>Radio curvatura m</b>
	<b>Deflexión 1/100 mm</b>			<b>Deflexión 1/100 mm</b>		
	<b>Do</b>	<b>D25</b>		<b>Do</b>	<b>D25</b>	
<b>Promedios (Do)</b>	0.41	0.30	60852	0.34	0.27	53396

<b>Desviación estándar (Do)</b>	0.09	0.12		53396	0.08	
<b>Deflexión característica (Dc)</b>	0.56			0.47		
<b>Deflexión admisible (Da)</b>	0.70			0.70		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.52 Comparación losa tradicional vs losa corta

<b>Determinación de la deflexión característica</b>						
<b>Parámetros</b>	<b>Diferencia</b>		<b>Radio curvatura m</b>	<b>Variación relativa %</b>		<b>Radio curvatura m</b>
	<b>Deflexión 1/100 mm</b>			<b>Deflexión 1/100 mm</b>		
	<b>Do</b>	<b>D25</b>		<b>Do</b>	<b>D25</b>	
<b>Promedios (Do)</b>	0.07	0.03	7456.36	22	10	14
<b>Desviación estándar (Do)</b>	0.01	0.04		12	58	
<b>Deflexión característica (Dc)</b>	0.09			19		

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos, de la comparación de los valores de las deflexiones características de los pavimentos rígidos; se puede observar que los valores de las deflexiones, que se producen en los pavimentos rígidos tradicionales, son mayores en 19 % con relación a las deflexiones de los pavimentos rígidos con losas cortas.

Tabla 3.53 Resumen comparativo de comportamiento funcional

<b>Comportamiento funcional</b>		
	<b>Losa normal</b>	<b>Losa corta</b>
<b>Rugosidad superficial</b>	<p>-Se perciben menores vibraciones al momento de la circulación, por tanto hay menor probabilidad de dañar las mercancías transportadas. Menor desgaste de los vehículos y consumo de energía.</p> <p>-Menor ruido durante la circulación de vehículos.</p>	<p>-Se perciben mayores vibraciones al momento de la circulación, debido al mayor número de juntas, lo que afecta la comodidad de circulación del usuario de la vía.</p> <p>-Mayor ruido durante la circulación de vehículos en la carretera, como consecuencia del mayor número de separaciones (juntas).</p>
<b>Textura</b>	-Adecuada capacidad para evacuar el agua de la interface rueda-pavimento, debido a la apropiada adherencia y el rozamiento; entre la rueda y el pavimento.	-Adecuada capacidad para evacuar el agua de la interface rueda-pavimento, debido a apropiada adherencia y el rozamiento entre la rueda y el pavimento.
<b>Fricción superficial</b>	-Buena resistencia al deslizamiento.	-Mayor resistencia al deslizamiento; por presentar mayor rugosidad al esfuerzo de frenado.
<b>Trazado de la carretera</b>	-Con un buen trazado, el pavimento funciona en excelentes condiciones, es decir sin cambios extremos, en las pendientes longitudinales de la carretera.	-Con un buen trazado, el pavimento funciona en excelentes condiciones, es decir sin cambios extremos, en las pendientes longitudinales de la carretera.
<b>Fisuras</b>	-Presenta mayores fisuras en poco tiempo.	-Presenta menores fisuras, debido a la reducción de las dimensiones de la losa, lo que evitaría el fisuramiento temprano, al ser estas losas capaces de distribuir mejor la carga en la estructura de la losa.

Fuente: Elaboración propia

### **3.4 MANTENIMIENTO**

Cuando los pavimentos de concreto son utilizados de acuerdo a las especificaciones para las que se crearon, no requieren de mayor mantenimiento. No obstante, con el paso del tiempo es normal que el pavimento de concreto presente algunas fallas superficiales; sin embargo, esta clase de deterioro no afecta su estructura ni su durabilidad. Al presentarse algún tipo de estas fallas, es recomendable aplicar técnicas de mantenimiento y reparación de los pavimentos de concreto para extender su vida útil.

De la mano de las intervenciones, se deberá considerar incluir el mantenimiento de las obras a construir a través del tiempo.

Las actividades a considerar para el mantenimiento de las obras de pavimento rígido, se pueden ordenar en tres grupos específicos:

Mantenimiento preventivo, periódico y correctivo (atención de emergencias).

#### **3.4.1 Mantenimiento preventivo o rutinario**

Este mantenimiento comprende obras programadas con intervalos variables de tiempo, destinadas a mantener las condiciones y especificaciones del nivel de servicio original de la vía. Puede incluir: limpieza de obras de drenaje, sellos de juntas, reparación de menor escala como tratamientos superficiales para desprendimientos, etc.

#### **3.4.2 Mantenimiento periódico**

Corresponde todas las actividades necesarias para solucionar los problemas de fallas superficiales y en algunas ocasiones aumentar la vida útil de los elementos del pavimento. Puede incluir sello de fisuras en elementos de placa de concreto hidráulico.

#### **3.4.3 Mantenimiento correctivo (atención de emergencias)**

Las actividades generales de atención de emergencias pueden ser necesarias por pérdida de banca por sismo, falla, evento de lluvia o inundación o avalancha, derrumbes, sobrecargas (cargas extradimensionadas) y puede incluir demolición o

reconstrucción de la placa de concreto, reparación o reconstrucción de obras de drenaje, reconstrucción de capa granular, entre otras.

Tabla 3.54 Resumen comparativo de mantenimiento

<b>Mantenimiento</b>		
	<b>Losa tradicional</b>	<b>Losa corta</b>
<b>Mantenimiento preventivo o rutinario</b>	<p>Limpieza de obras de drenaje, sellos de juntas, tratamientos superficiales para desprendimientos.</p> <p>Lechadas de cemento o inyecciones de resinas, para las fisuras que ocurren debido a la contracción plástica, la cual se crea en la superficie del concreto, por la deshidratación en estado fresco.</p> <p>Cepillado de los pavimentos debido a la falta de lisura o irregularidad para restituir la regularidad superficial de los pavimentos.</p>	<p>Limpieza de obras de drenaje, mayor costo en la ejecución de los sellos de juntas, debido a las dimensiones menores de las losas de concreto, tratamientos superficiales para desprendimientos.</p> <p>Ahorro en la elaboración de lechadas de cemento o inyecciones de resinas, debido a la reducción de las fisuras por contracción plástica, la cuales serán menores debido a la superficie menor de las losas de concreto.</p> <p>Cepillado de los pavimentos debido a la falta de lisura o irregularidad para restituir la regularidad superficial de los pavimentos.</p>

Fuente: Elaboración propia

<b>MANTENIMIENTO</b>		
	<b>Losa tradicional</b>	<b>Losa corta</b>
<b>Mantenimiento periódico</b>	<p>Relleno con morteros de cemento, de concreto fino o de resinas semirrígidas o flexibles, debido a la rotura de bordes en la losa y desportillamiento en las juntas, debido a la penetración de pequeñas piedras en las juntas, que al cerrarse hacen saltar el concreto en las proximidades de las juntas.</p> <p>Retexturización, a través de una ranuración longitudinal, que restablece la macrotextura del pavimento de concreto.</p> <p>Parches adheridos con morteros según el espesor debido a los descaramientos o peladuras causados por heladas o sales.</p>	<p>Mayor costo y trabajo, en el relleno con morteros de cemento, de concreto fino o de resinas semirrígidas o flexibles, como consecuencia de la mayor probabilidad de desportillamientos, debido al mayor número de juntas.</p> <p>Retexturización, a través de una ranuración longitudinal que restablece la macrotextura del pavimento de concreto.</p> <p>Parches adheridos con morteros según el espesor debido a los descaramientos o peladuras causados por heladas o sales.</p>
<b>Mantenimiento correctivo</b>	<p>Demolición y reconstrucción de la placa de concreto, reparación o reconstrucción de obras de drenaje, reconstrucción de capa granular, etc.</p>	<p>Demolición y reconstrucción de la placa de concreto, reparación o reconstrucción de obras de drenaje, reconstrucción de capa granular, etc.</p>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.56 Resumen comparativo de las ventajas de un pavimento rígido

<b>Ventajas de un pavimento rígido (losas tradicionales y losas cortas)</b>		
<b>Con relación a otros pavimentos</b>	<b>Ambientales</b>	
<p>-Menor movimiento de tierra. (Aprox. 40%)</p> <p>-Menor congestión de transporte durante la construcción.</p> <p>-Menor tiempo de ejecución (Aprox. 20%).</p> <p>-Apertura del servicio al público: 72 horas.</p> <p>-Apertura al tránsito de obra: 24 horas.</p> <p>-Menor costo de mantenimiento</p> <p>-Se evitan interrupciones de tránsito por trabajos de mantenimiento</p>	<p>-30% mayor iluminancia que en superficies de asfalto.</p> <p>-Menor generación de calor.</p> <p>.Resistente al ataque de hidrocarburos.</p> <p>-Resistente al fuego.</p> <p>-Menor agresión ambiental.</p> <p>-Menor huella de carbono.</p> <p>-Menor consumo de combustible (aprox 4%).</p> <p>-Mejor estabilidad del IRI (Indice de Regularidad).</p> <p>-Mejor adherencia bajo la lluvia.</p>	<p>-Debido a su color claro, y por lo tanto a su reflectividad, mejoran las condiciones de la visibilidad nocturna. Esto reduce el consumo de energía eléctrica en la iluminación de los caminos, lo que implica una menor emisión de gases de efecto invernadero secundaria.</p> <p>-Las superficies claras, como las de concreto, absorben menos calor y contribuyen de esta forma a la reducción de los efectos de las islas de calor.</p> <p>-En este contexto, los pavimentos de colores claros, como los de Concreto, pueden jugar un papel beneficioso ya que limitan el calentamiento y reducen la contaminación.</p>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.57 Ventajas de una losa tradicional vs losa corta

<b>Ventajas</b>			
<b>Losa tradicional</b>	<b>Losa corta</b>		
<p>-Todas las ventajas de un pavimento rígido con relación a otros pavimentos.</p>	<p>-Todas las ventajas de un pavimento rígido con relación a otros pavimentos, además de las siguientes ventajas con relación a las losas tradicionales:</p>		
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p>-El diseño de losas de geometría corta reemplaza las losas de pavimentos de hormigón, de más de 3.5 metros, por un conjunto de losas</p> <p>-Delgadas y más pequeñas. Las dimensiones de estas últimas permiten que nunca sean cargadas por más de un eje de ruedas a la vez, posibilitando la</p> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p>-Mejor repartición de la carga y en consecuencia mayor durabilidad.</p> <p>Mayor vida útil.</p> <p>-Su diseño se adapta a los diversos equipos de colocación a utilizar, desde cercha tradicional a tren pavimentador, posibilitando la obtención de mayores rendimientos de avance.</p> </td> </tr> </table>	<p>-El diseño de losas de geometría corta reemplaza las losas de pavimentos de hormigón, de más de 3.5 metros, por un conjunto de losas</p> <p>-Delgadas y más pequeñas. Las dimensiones de estas últimas permiten que nunca sean cargadas por más de un eje de ruedas a la vez, posibilitando la</p>	<p>-Mejor repartición de la carga y en consecuencia mayor durabilidad.</p> <p>Mayor vida útil.</p> <p>-Su diseño se adapta a los diversos equipos de colocación a utilizar, desde cercha tradicional a tren pavimentador, posibilitando la obtención de mayores rendimientos de avance.</p>
<p>-El diseño de losas de geometría corta reemplaza las losas de pavimentos de hormigón, de más de 3.5 metros, por un conjunto de losas</p> <p>-Delgadas y más pequeñas. Las dimensiones de estas últimas permiten que nunca sean cargadas por más de un eje de ruedas a la vez, posibilitando la</p>	<p>-Mejor repartición de la carga y en consecuencia mayor durabilidad.</p> <p>Mayor vida útil.</p> <p>-Su diseño se adapta a los diversos equipos de colocación a utilizar, desde cercha tradicional a tren pavimentador, posibilitando la obtención de mayores rendimientos de avance.</p>		

	Reducción de tensiones y disminución de espesor.	
--	---	--

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1 Conclusiones

- En el presente trabajo de investigación; se han cumplido los objetivos planteados, debido a que se logra obtener resultados, que nos permiten realizar un análisis comparativo, del desempeño estructural de los pavimentos con losas cortas de hormigón y con losas tradicionales.
- Con los resultados obtenidos por las tres metodologías efectuadas a lo largo del desarrollo de esta investigación se puede observar que, el desempeño de las losas de pavimentos son susceptibles a los esfuerzos generados por las diferentes combinaciones de cargas y por las condiciones ambientales de las zonas en las que serán puestos en servicio, porque esto influye bastante en su comportamiento.
- Basados en las configuraciones de los ejes de carga y en el dimensionamiento propuesto de las losas en los pavimentos rígidos, realizadas en este trabajo

investigación, se determina como losas de dimensiones cortas, aquellas que un solo set de ruedas se apoya por cada losa, y esto fue posible en losas menores a 2.2x2.2 metros, porque estas dimensiones se adecuan a las distancias de los ejes de los vehículos que transitaran por las zonas en estudio.

- Una vez realizadas las respectivas simulaciones en la transcurso de la metodología 1, se puede observar que los esfuerzos resultantes de las combinaciones de carga y las condiciones ambientales de cada una de las zonas de estudio; registraron valores menores en las losas de dimensiones cortas con respecto a los producidos en las losas con dimensiones tradicionales es por ello que podemos concluir que efectivamente el tamaño y la forma geométrica de una losa influye en el comportamiento de un pavimento rígido.
- Es importante dentro del desarrollo de la metodología 2 que se cumplan con las condiciones de dosificación y granulometría de los agregados para la elaboración de los pavimentos, para que éstos puedan satisfacer las condiciones que se requieren de un buen desempeño en su periodo de vida útil, tanto para los pavimentos con losas tradicionales como con losas cortas.
- En la última parte de este trabajo de investigación a través de la ejecución de práctica viga benkelman se pudo constatar que los pavimentos rígidos presentan mínimas deformaciones casi imperceptibles esto se refleja tanto en las mediciones realizadas en campo como en los cálculos realizados en gabinete, esto también dependerá del correcto método constructivo de las losas de pavimento es por ello que previo a la construcción de un pavimento se deben analizar todas las alternativas posibles.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Continuar con el estudio sobre el diseño de losas de dimensiones cortas, con la finalidad de perfeccionar una metodología alternativa que sea viable para el diseño de pavimentos rígidos en nuestro medio.
- Trabajar en el desarrollo de especificaciones para la construcción de losas de dimensiones cortas en pavimentos rígidos; ya que las características especiales

de este tipo de pavimentos requiere consideraciones que deben ser incorporadas en normativas y manuales de construcción utilizados en el país.

- Se recomienda realizar un estudio del progreso del deterioro de pavimentos contruidos con losas de dimensiones cortas menores a las tradicionales para poder determinar la funcionalidad de éstos en la práctica.
- Tomar en cuenta todos los factores que influyen en el diseño de un pavimento rígido y registrarlos en tablas donde sea más accesible la información y no se tenga que tomar mucho tiempo en buscar manuales específicos de diseño.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- |   |  |
|---|--|
| <b>1. ASOCEM (ASOCIACIÓN DE DEL PRODUCTORES DE CEMENTOS PERÚ)</b> | " Boletín técnico N° 81"   |
| <b>2. DR. JUAN PABLO COVARRUBIAS</b>                              | "Análisis comparativo de costos en la rehabilitación de pavimentos para carreteras"  |
| <b>3. ING. MARIO BECERRA SALAS</b>                                | " Tópicos de pavimentos de concreto"<br>diseño, construcción y supervisión   |
| <b>4. PABLO EMILIO SÁNCHEZ CAMPOS</b>                             | " Elementos principales que componen un pavimento "  |
| <b>5. UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN</b>                          | " Libro de Pavimentos "  |
| <b>6. VÍCTOR SÁNCHEZ BLANCO</b>                                   | " Ingeniería de carreteras volumen I "   |
| <b>Tesis de grado</b>   |  |
| <b>1. JOSÉ DANIEL ORDOÑEZ</b>                                     | "Pavimentos de losas cortas de concreto de concreto para vías tercias en Colombia"   |
| <b>2. JUAN CARLOS MALTEZ ROMILLO</b>                              | " Análisis comparativo de costos en la rehabilitación de pavimentos para carreteras"   |
| <b>3. KATERINE SORUCO PARAVICINI</b>                              | "Comparación entre resultados de la aplicación de la deflectometría y ensayos valor de soporte CBR relativo a la estimación del módulo resiliente en el tramo Túnel Falda la Queñua – San Lorencito” |
| <b>Otros:</b>   |  |

- Mauricio Salgado (Instituto Chileno del Hormigón), " Análisis del Costo del Ciclo de Vida de pavimentos "; " Desempeño de los pavimentos de concreto de losas cortas en varios países".
- HORMIVÍA losa corta (hormigones para pavimentos con diseño de losas de geometría optimizada según la tecnología de pavimentos y que cumplen las especificaciones técnicas de pavimentación).
- LOSAS PACASMAYO (la mejor alternativa en concreto con geometría optimizada).
- Guía AASHTO "diseño de estructuras de pavimentos, 1993".
- Guía para el diseño de vías de alto volumen; Asociación Dominicana de Productores de Cemento Portland.
- Medida de las deflexiones en firmes cálculo mecánico de pavimentos a partir de ensayos no destructivos.
- "Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos"
- 6º Congreso Iberoamericano de Pavimentos de Hormigón, Puerto Iguazú, Argentina.