

**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.**

### **1.1. INTRODUCCIÓN.**

Los pavimentos de concreto son reconocidos como una solución vial debido a que siendo competitivos en términos de costos de construcción, se destacan además por su larga vida, por su resistencia y por ser ecológicamente amigables. Entre sus principales fortalezas se deben considerar sus menores costos de mantenimiento y el menor costo de operación vehicular. Ya que el pavimento rígido es poco utilizado se pretende realizar el estudio de este nuevo software PCA-cálculo y analizar la aplicabilidad en nuestro medio.

Se utilizarán métodos estándares que son el AASHTO-93 (American Association of State Highway and Transportation Officials), el método Westergaard y método PCA para el cálculo del pavimento rígido, que serán comparativos con el nuevo software PCA-cálculo al momento de analizar los principios, parámetros, procesamiento y resultados obtenidos.

Cada método adopta factores de diseño diferentes con otros similares, dándole a cada uno de estos factores su grado de influencia respectivo al momento de realizar los cálculos, buscando un objetivo común que es el de determinar los espesores de losas que sean apropiados para soportar las cargas de tráfico en las calles, caminos y carreteras.

El software PCA-cálculo es un programa para el diseño de pavimentos de concreto, que utiliza la metodología PCA – 84. Este sistema automatizado nos permite determinar los espesores de losas adecuadas, verificando el consumo de fatiga y el consumo de erosión de manera más eficiente. Con los datos obtenidos en la práctica se determina el espesor de losa que lograra mejores resultados y será más aplicable en una determinada zona de estudio.

La importancia de la utilización del software PCA – cálculo es que tenga facilidad de uso y sea factible su utilización en nuestro medio facilitando los diseños en pavimentos rígidos.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN.**

Es necesario mantenerse actualizado en este medio en constante cambio y desarrollo, es por esto que estudiaremos el nuevo software PCA - calculo, para así poder comparar los resultados con los métodos tradicionales y sacar conclusiones de su aplicabilidad en nuestro medio, si podremos utilizarlo o si necesitaremos más desarrollo técnico e intelectual al momento de estudiar los factores con los que se trabaja, para así contar con datos confiables y resultados satisfactorios.

El avance de la tecnología en cuento a software informático aplicado a las carreteras es evidente cada día y en todas partes del mundo por ello es necesario que en nuestro medio en el área vial sea utilizado.

En la actualidad el tiempo es un factor muy importante, los programas informáticos reducen considerablemente los tiempos de diseño haciendo posible la consideración de más alternativas al momento del análisis de los pavimentos.

En lo académico es importante reforzar los conocimientos teóricos con la aplicación y los programas como PCA – cálculo permiten su aplicabilidad de esos conocimientos adquiridos. También es importante realizar diseños comparativos con diferentes software para ver sus ventajas y desventajas tanto en el ingreso de datos, procesamiento y resultados.

## **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

### **1.3.1. SITUACIÓN PROBLÉMICA.**

En la actualidad el tiempo que se necesita para el diseño de los espesores de pavimentos rígidos es muy extenso, por esta razón el tiempo es un parámetro que requiere ser atendido, ya que al reducir el tiempo que se requiere podemos realizar una mayor cantidad de cálculos en un tiempo reducido, pudiendo así obtener más alternativas de diseño de las cuales podremos estudiar la que se adecue más a los requerimientos que esta posea.

Por otra parte el tiempo que se necesita para el cálculo de cada alternativa en relación con la calidad de los resultados es muy importante, ya que al realizar una mayor cantidad de alternativas podremos comparar y obtener resultados más precisos.

Al realizar los cálculos de forma manual con los métodos tradicionales nos deja una probabilidad más alta de cometer errores accidentales.

Es importante en nuestro medio ir actualizando la metodología del dimensionamiento de pavimentos, ese objeto tiene el nuevo software PCA – calculo desarrollado en una universidad de Colombia.

La aplicabilidad en nuestro medio de metodologías actualizadas permite mejorar los conocimientos además de tener alternativas de métodos y disminuir los tiempos en el dimensionamiento.

El aporte académico será incorporar este nuevo software en el medio universitario para su utilización como una herramienta nueva y actualizada.

### **1.3.2. PROBLEMA.**

¿Será que el programa PCA–cálculo pueda procesar los parámetros de una manera efectiva, brindando resultados satisfactorios en comparación con los métodos tradicionales, pudiendo así utilizar este software como una alternativa para el diseño de espesores de pavimento rígido?

## **1.4. OBJETIVOS.**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL.**

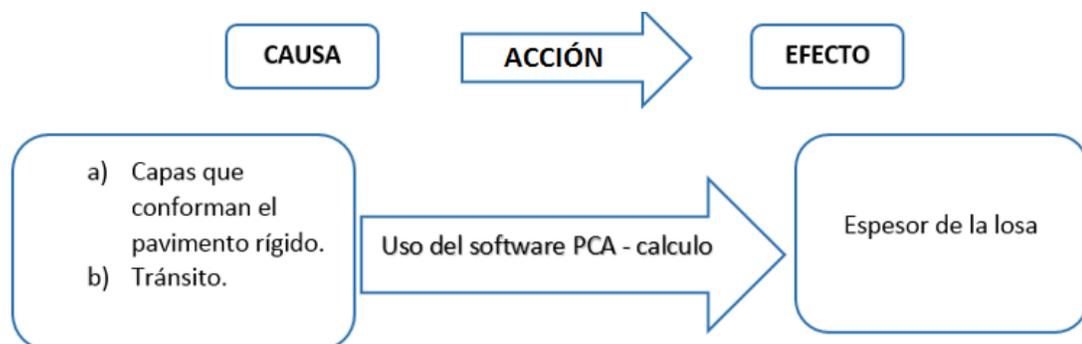
Analizar los principios, parámetros, procesamiento y resultados del nuevo software PCA – cálculo comparando con los métodos tradicionales y su aplicabilidad en nuestro medio.

### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Realizar los estudios y ensayos necesarios según la norma AASHTO 93 para determinar los parámetros de diseño utilizados en los métodos tradicionales que son AASHTO 93, PCA y WESTERGAARD.

- Determinar el espesor y la resistencia del pavimento rígido mediante el ensayo de extracción de núcleos y esfuerzo a compresión en tres puntos diferentes en cada tramo de estudio.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de los parámetros de diseño y el dimensionamiento según cada metodología de diseño.
- Aplicar el software PCA-cálculo con datos obtenidos en tres tramos de la ciudad de Tarija.
- Comparar los resultados obtenidos por cada método estableciendo su aplicabilidad en nuestro medio.
- Validar la utilización del nuevo software PCA-cálculo mediante la comparación de resultados obtenidos por los diferentes métodos, por el tiempo de aplicación de un método a otro y por las bondades que el software puede tener.
- Analizar y comparar sus principios, ventajas y desventajas con los que trabaja cada método.
- Establecer conclusiones y recomendaciones de acuerdo al estudio realizado.

## 1.5. VARIABLES.



### 1.5.1. VARIABLE INDEPENDIENTE.

Las variables independientes serán las capas de suelo que conforma un pavimento rígido ya que según las cualidades que tengan estas capas nos brindara los parámetros

de diseño que se requieren, otra variable independiente vendría a ser el tránsito que se tendrá en dicho tramo.

### **1.5.2. VARIABLE DEPENDIENTE.**

La variable dependiente es el espesor de la losa que se calcula mediante el uso del programa PCA—cálculo con los parámetros de diseño obtenidos de las capas de suelo que conforman el pavimento y según el tránsito que esta losa soporte.

### **1.6. MÉTODOS.**

**Método inductivo** es aquel método científico que alcanza conclusiones generales partiendo de hipótesis o antecedentes en particular. El método inductivo suele basarse en la observación y la experimentación de hechos y acciones concretas para así poder llegar a una resolución o conclusión general sobre estos; es decir en este proceso se comienza por los datos y finaliza llegando a una teoría, por lo tanto se puede decir que asciende de lo particular a lo general.

En este proyecto usaremos este método inductivo para visualizar las características y parámetros para el dimensionamiento de una losa de concreto hidráulico y llegar a una conclusión general pudiendo así decir que para ciertas características de subrasante y tráfico tendremos como resultado un determinado espesor de losa.

**Método deductivo** se refiere a aquel método donde se va de lo general a lo específico. Este comienza dando paso a los datos en cierta forma válidos, para llegar a una deducción a partir de un razonamiento de forma lógica o suposiciones; o sea se refiere a un proceso donde existen determinadas reglas y procesos donde gracias a su asistencia, se llegan a conclusiones finales partiendo de ciertos enunciados o premisas.

Este método deductivo se utiliza en el proyecto al estudiar los parámetros de diseño que utiliza el software PCA – cálculo, estos parámetros en nuestro medio son medibles y calculados con determinados ensayos también contamos con datos registrados y validados, así obteniendo todas las variables que este software necesita para el dimensionamiento de pavimento rígido. En conclusión el software PCA – cálculo es aplicable en nuestro medio.

## 1.7. TÉCNICAS.

Una técnica es un conjunto de procedimientos reglamentados y pautas que se utiliza como medio para llegar a un cierto fin. La diferencia entre método y técnica es que el método es el conjunto de pasos y etapas que debe cumplir una investigación y este se aplica a varias ciencias mientras que técnica es el conjunto de instrumentos en el cual se efectúa el método.

La técnica de aplicación se utiliza en nuestro trabajo al aplicar el programa PCA – cálculo siguiendo un procedimiento para determinar los parámetros de diseño que el programa requiere y así llegar a dimensionar el espesor de losa.

## 1.8. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO.

Se utilizara la estadística descriptiva, los siguientes puntos fueron obtenido de Moya Calderon, R. (1991).<sup>1</sup>

- **Media:** En matemáticas y estadística, la media aritmética (también llamada promedio o simplemente media) de un conjunto finito de números es el valor característico de una serie de datos cuantitativos objeto de estudio que parte del principio de la esperanza matemática o valor esperado, se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos. Cuando el conjunto es una muestra aleatoria recibe el nombre de media muestral siendo uno de los principales estadísticos muestrales.

**Ecuación 1: MEDIA.**

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

**Fuente:** Moya Calderon, R. (1991).

$\bar{X}$ = Media

$X_i$  = Dato cuantitativo.

$n$  = Numero de sumandos.

- **Moda:** En estadística, la moda es el valor con mayor frecuencia en una distribución de datos.
- **Mediana:** La mediana estadística es el número central de un grupo de números ordenados por tamaño. Si la cantidad de términos es par, la mediana es el promedio de los dos números centrales.

Si el número de observaciones es impar basta con ordenar los datos en orden de magnitud creciente  $X_1, X_2, \dots, X_n$  y tomar como mediana el valor de la observación central es decir:

**Ecuación 2: MEDIANA EN MUESTRA IMPAR.**

$$\bar{X} = X_{me} = Me = X[(n+1)/2]$$

**Fuente:** Moya Calderon, R. (1991).

Cuando el número de observaciones es par, en este caso, después de ordenado el conjunto de observaciones existen dos valores centrales  $X_{(n/2)}$  y  $X_{[(n/2)+]}$  pudiéndose tomar como mediana cualquiera de ellos, o cualquier valor entre estos dos. Se acostumbra tomar como mediana la semisuma de ambos valores es decir:

**Ecuación 3: MEDIANA EN MUESTRA PAR.**

$$\bar{X} = X_{me} = Me = \frac{X_{\left(\frac{n}{2}\right)} + X_{\left[\left(\frac{n}{2}\right) + 1\right]}}{2}$$

**Fuente:** Moya Calderon, R. (1991).

$\bar{X}$  = Media.

Me = Mediana.

X = Dato cuantitativo.

n = Numero de sumandos.

- **Desviación standard:** La desviación típica es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Dicho de otra manera, la desviación estándar es simplemente el "promedio" o variación esperada con respecto a la media aritmética.

**Ecuación 4: DESVIACIÓN STANDARD.**

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

**Fuente:** Moya Calderon, R. (1991).

N= Tamaño de la muestra

$\bar{x}$ = Media

- Varianza: En teoría de probabilidad, la varianza de una variable aleatoria es una medida de dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media. Está medida en la unidad de medida de la variable al cuadrado. Por ejemplo, si la variable mide una distancia en metros, la varianza se expresa en metros al cuadrado. La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza, es una medida de dispersión alternativa expresada en las mismas unidades de los datos de la variable objeto de estudio. La varianza tiene como valor mínimo 0.

**Ecuación 5: VARIANZA.**

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 \right) - \bar{X}^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i < j} (X_i - X_j)^2$$

**Fuente:** Moya Calderon, R. (1991).

$\bar{x}$  = Media.

X = Dato cuantitativo.

n = Numero de sumandos.

**1.9. ALCANCE.**

Este proyecto está centrado en buscar una alternativa para el diseño de pavimentos rígidos que es el software PCA-cálculo, para lograr el estudio de aplicación de este software se compara con los métodos tradicionales de diseño como es el método

AASHTO 93, PCA y WESTERGARD, que se calcularan de forma manual según su metodología.

Cuenta con una teoría necesaria para poder abordar el contenido del proyecto donde se habla de los pavimentos rígidos, los métodos utilizados con sus principios y bondades que cada uno de estos presenta, los parámetros de diseño necesarios para el dimensionamiento según cada método y el manual del software.

En la aplicación práctica se realiza el análisis, las especificaciones y el cálculo de cada uno de los parámetros de diseño que posee cada método. Cuenta con el cálculo de dimensionamiento de cada uno de estos métodos y del tema de estudio que es el software PCA-cálculo una vez obtenidos los parámetros de entrada de cada uno de estos, donde veremos cómo funciona este software, con qué características cuenta, con que principios trabaja y como procesa los valores de entrada, comparándolos con los métodos tradicionales calculados manualmente y así obtenemos conclusiones a cerca del funcionamiento del software y su aplicabilidad.

La ubicación de estudio es en tres tramos de la ciudad de Tarija donde se realizó los estudios y ensayos necesarios para calcular una alternativa de diseño con cada uno de los métodos ya mencionados.

- El primer tramo es el de la avenida Circunvalación entre la avenida Froylan Tejerina y la ruta norte.
- El segundo tramo es en la avenida Jaime Paz Zamora entre la calle España y la avenida Padilla.
- El tercero es en los ingresos a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.

En el presente proyecto de grado presenta en su contenido un ejemplo de cálculo de un periodo de estudios por cada tramo para poder seguir el procedimiento que se llevó a cabo para su ejecución. Los ensayo que se llevan a cabo son el ensayo del cono dinámico de penetración, la extracción de núcleos y la rotura de probetas, también se realiza el aforo vehicular para cada tramo para así obtener todos los parámetros necesarios para la aplicación del software.

**CAPÍTULO II**

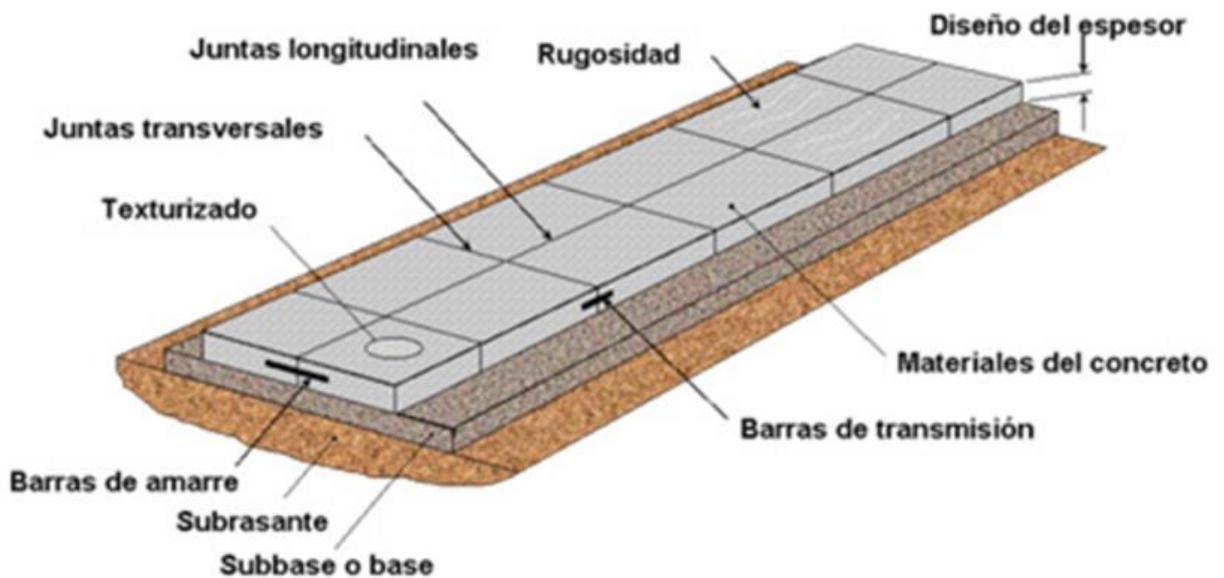
**PAVIMENTOS RÍGIDOS PROPIEDADES Y**

**CARACTERÍSTICAS**

## CAPÍTULO II: PAVIMENTOS RÍGIDOS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS.

### 2.1. CONCEPTO.

**Ilustración 1: ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.**



**Fuente:** American Concrete Pavement Association (ACPA).

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son 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.

Los pavimentos se han clasificado en flexibles y rígidos. Esta distinción obedece al tipo de superficie de rodamiento, aunque la principal diferencia se refiere a la forma cómo cada uno trabaja, cómo soporta y distribuye los esfuerzos producidos por las cargas, además de los materiales que lo conforman.

El pavimento, es una estructura formada por una o más capas de material pétreo tratado, cuya función es la de proporcionar al usuario un tránsito cómodo, seguro y rápido, al costo más bajo posible.

Los tipos de Pavimento existentes son: Flexibles, rígidos y otros (Empedrados, adoquín, estampado, etc).

Los pavimentos rígidos están constituidos en su forma más sencilla; por una subrasante, una capa subbase y una losa de hormigón; este tipo de pavimento actualmente es poco utilizado en nuestro país debido a su alto costo y a su tedioso proceso constructivo, pero el mismo debe ser empleado en carreteras en donde el tránsito vehicular sea elevado, en especial los vehículos pesados, ya que este tipo de pavimento tiende a ser más duradero en el tiempo que los pavimentos flexibles, y requieren de menos mantenimiento. (Centeno, O. 20 de abril de 2010)<sup>2</sup>

La losa debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, absorbe gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento lo que produce buena distribución de las cargas de rueda, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante.

Para cumplir sus funciones, un pavimento debe satisfacer dos condiciones básicas: ofrecer una buena y resistente superficie de rodamiento, con la rugosidad necesaria para garantizar una buena fricción con la llanta de los vehículos y con el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos; en segundo lugar, debe poseer la resistencia apropiada y las características mecánicas convenientes para soportar las cargas impuestas por el tránsito sin falla y con deformaciones que no sean permanentes y que garanticen un tráfico en buenas condiciones.

Las características de resistencia y deformabilidad se satisfacen con una capa de material que se encargue de distribuir los esfuerzos de tal modo que a la subrasante lleguen en niveles tolerables, que no produzcan falla, ni asentamientos u otras deformaciones perjudiciales. Esta capa debe estar formada por materiales que son los más adecuados para llenar esta función estructural; esta es la losa de concreto que cumple esta función estructural. La capacidad de carga de los materiales friccionantes es baja en la superficie por falta de confinamiento, razón por la que se requiere que sobre la base exista una capa de material cohesivo y con resistencia a la tensión; en los pavimentos rígidos es la losa de concreto quien llena esta necesidad, por sus características de cohesión.

Las variables de diseño son el espesor, serviciabilidad, tránsito, transferencia de carga, propiedades del concreto, resistencia a la subrasante, drenaje, confiabilidad.

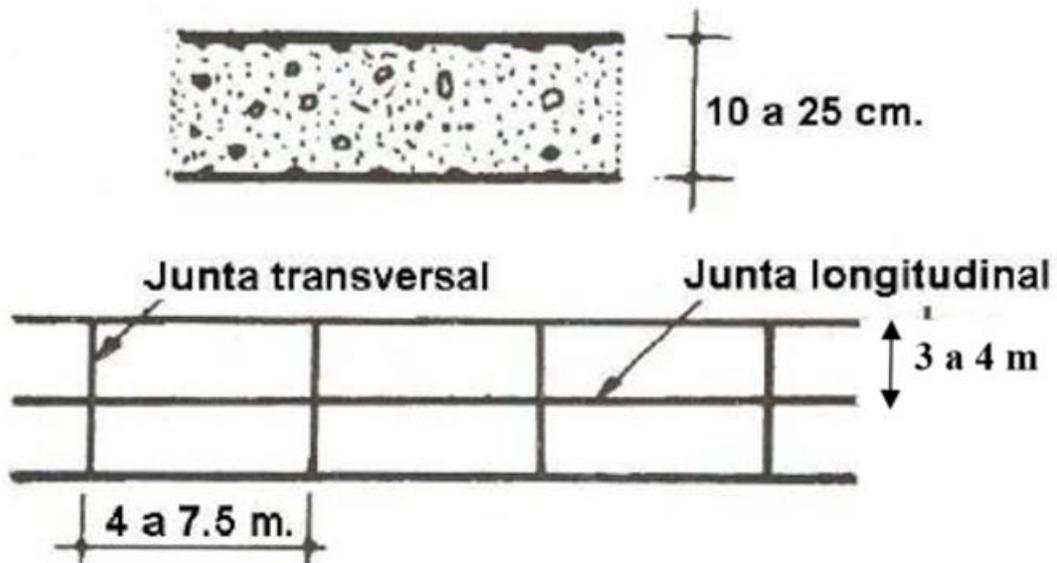
El propósito de diseño es el mismo que para otras estructuras de ingeniería ya que obtener el espesor mínimo que resultara en el costo anual más bajo, para los costos de inversión inicial y de mantenimiento. Si el espesor es mayor de lo necesario, el pavimento prestara un buen servicio con bajos costos de mantenimiento, pero el costo de inversión inicial serán altos. Si el espesor no es el adecuado, los costos prematuros y elevados de mantenimiento e interrupciones en el tráfico sobrepasaran los bajos costos iniciales. Una correcta ingeniería requiere que los diseños de espesores balanceen apropiadamente el costo inicial y los costos de mantenimiento. (Portland Cement Association, 1995)<sup>3</sup>

## **2.2.TIPOS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.**

A continuación, los párrafos abajo expuestos fueron extraídos de American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>4</sup>

➤ **Pavimentos de concreto simple sin pasadores.**

**Ilustración 2: PAVIMENTOS DE CONCRETO SIMPLE SIN PASADORES.**



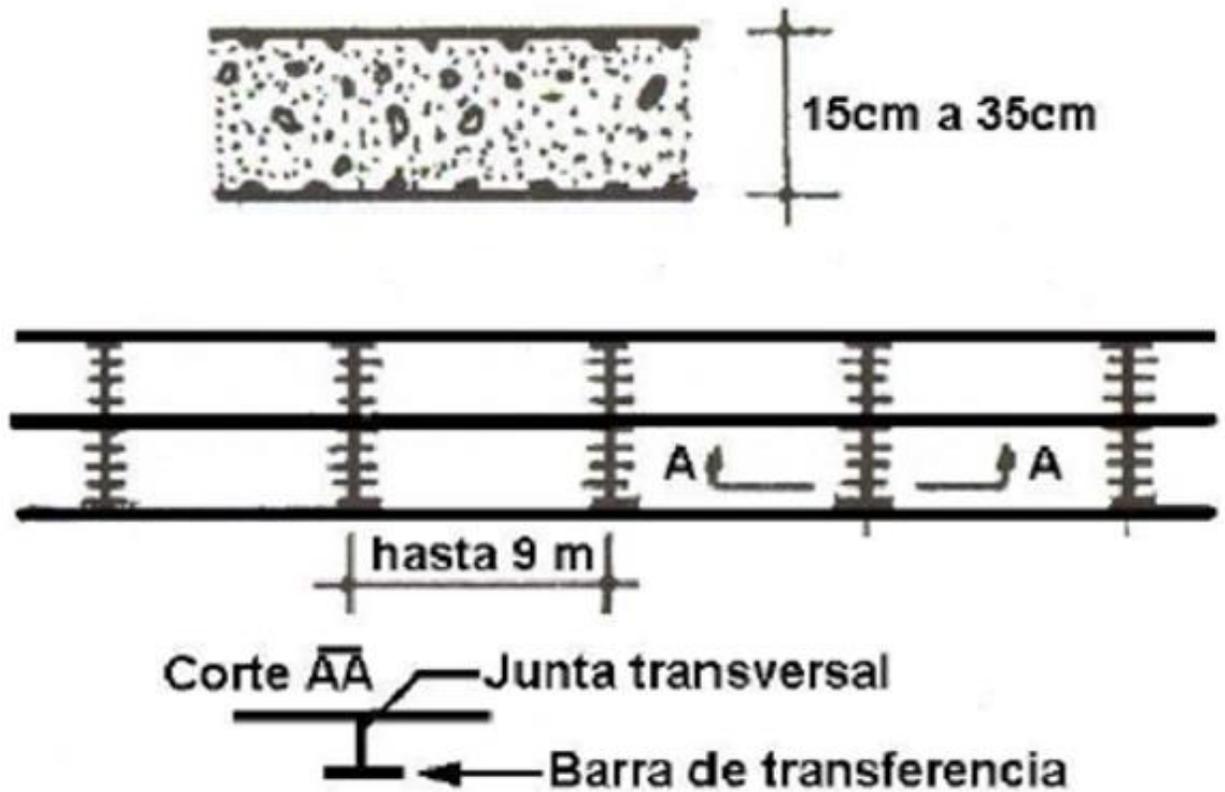
**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

Son pavimentos que no presentan refuerzo de acero ni elementos para transferencia de cargas, esta se logra a través de la trabazón de los agregados entre las caras agrietadas debajo de las juntas aserradas o formadas. Para que esta transferencia sea efectiva, es necesario que se use un espacio corto entre juntas.

Está constituido por losas de dimensiones relativamente pequeñas, en general menores de 6m de largo y 3,5 m de ancho. Los espesores varían de acuerdo al uso previsto. Este pavimento es aplicable en caso de tráfico ligero y clima templado y generalmente se apoyan directamente sobre la subrasante. Este tipo de pavimento es aplicable en caso de tráfico ligero y clima templado y generalmente se apoyan directamente sobre la subrasante.

➤ **Pavimentos de concreto simple con pasadores.**

**Ilustración 3:** PAVIMENTOS DE CONCRETO SIMPLE CON PASADORES.

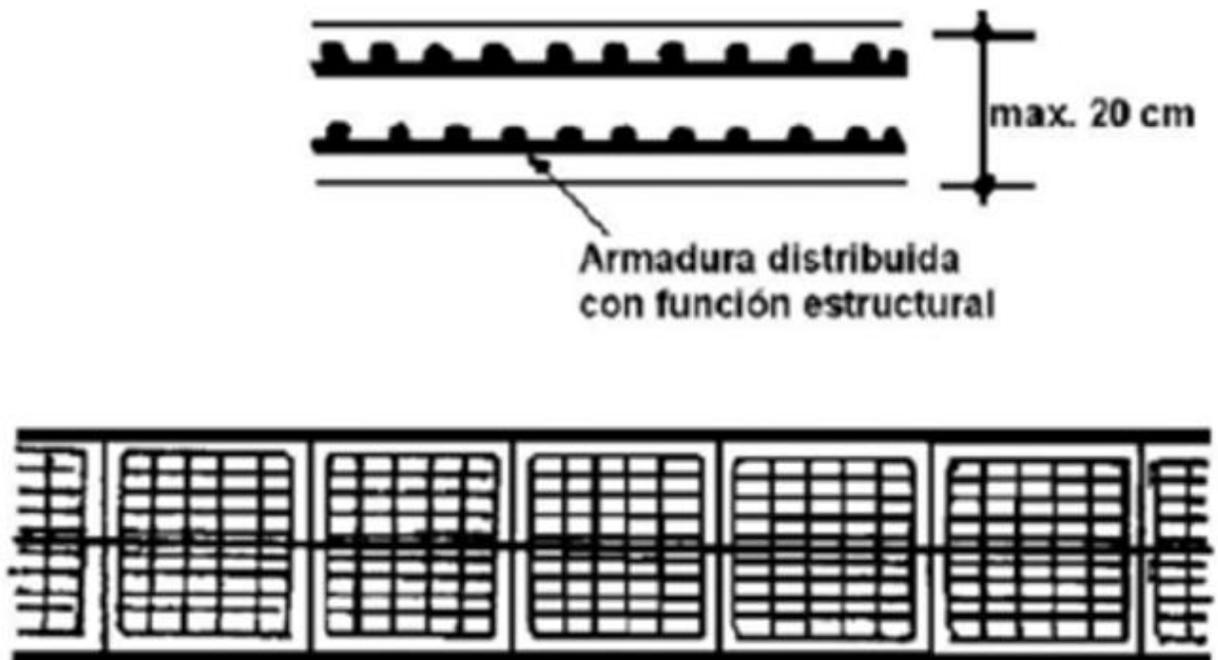


**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

Los pasadores son pequeñas barras de acero liso, que se colocan en la sección transversal del pavimento, en las juntas de contracción. Su función estructural es transmitir las cargas de una losa a la losa contigua, mejorando así las condiciones de deformación en las juntas. De esta manera se evitan los desplazamientos verticales diferenciales (escalonamientos). Es recomendable para tráfico diario que exceda los 500 ESALs (ejes simples equivalentes) con espesores de 15 cm o más.

➤ Pavimentos de concreto reforzado con juntas.

**Ilustración 4:** PAVIMENTOS DE CONCRETO REFORZADO CON JUNTAS.

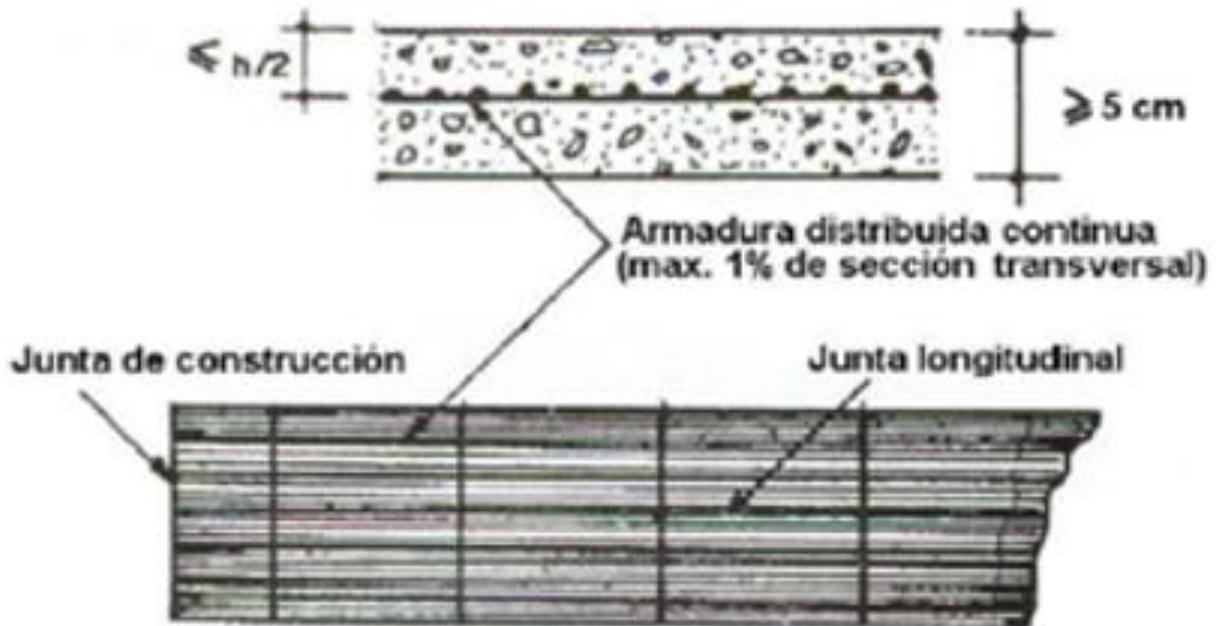


**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

Los pavimentos reforzados con juntas contienen además del refuerzo, pasadores para la transferencia de carga en las juntas de contracción. Este refuerzo puede ser en forma de mallas de barras de acero o acero electrosoldado. El objetivo de la armadura es mantener las grietas que pueden llegar a formarse bien unidas, con el fin de permitir una buena transferencia de cargas y de esta manera conseguir que el pavimento se comporte como una unidad estructural.

➤ **Pavimentos con refuerzo continuo.**

**Ilustración 5: PAVIMENTOS CON REFUERZO CONTINUO.**



**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

A diferencia de los pavimentos de concreto reforzado con juntas, estos se construyen sin juntas de contracción, debido a que el refuerzo asume todas las deformaciones, específicamente las de temperatura. El refuerzo principal es el acero longitudinal, el cual se coloca a lo largo de toda la longitud del pavimento. El refuerzo transversal puede o no ser requerido para este tipo de pavimento.

### **2.3.PROPIEDADES DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS.**

La consideración de dos propiedades básicas del pavimento revela que un solo principio se aplica a cada aspecto del diseño de las sub base y subrasantes. El módulo de elasticidad del hormigón oscila entre 280000 y 420000kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, característica elemental de resistencia.

A causa de estas propiedades, rigidez y resistencia, el pavimento de hormigón distribuye las cargas que soporta sobre una gran zona de la subrasante, las deflexiones

son pequeñas y las presiones unitarias transmitidas a la subrasante son muy reducidas. Se deduce en consecuencia que los pavimentos de hormigón no requieren subrasantes resistentes, sino de un valor soporte razonablemente uniforme.

Además de las propiedades estructurales comentadas, el pavimento rígido debe satisfacer funciones que pueden resumirse de la siguiente forma.

- a) Resistir las acciones de los agentes atmosféricos, a fin de conseguir la durabilidad o vida útil prevista en el diseño; por ejemplo la eliminación rápida del agua en la superficie del pavimento, con el fin de proteger la subrasante de las precipitaciones, con sus efectos en la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.
- b) Condiciones adecuadas de durabilidad, para resistir las solicitaciones de tráfico previsto durante el periodo de proyecto y repartir las presiones verticales ejercidas por las cargas, distribuyendo las mismas hasta reducir las tensiones producto de ellas a valores compatibles con la capacidad de soporte del terreno.
- c) Proporcionar una superficie de rodadura cómoda y de características permanentes bajo las cargas repetidas del tráfico, a lo largo de un periodo de tiempo en servicio. (Kraemer, C. 2003. *Ingeniería de carreteras*)<sup>5</sup>

## 2.4.COMONENTES EN LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Los componentes del pavimento rígido hacen referencia al libro de Herrera, A. (s.f).  
*A6 Diseño de pavimentos rígidos.*<sup>6</sup>

**Ilustración 6:** CAPAS QUE CONFORMAN EL PAVIMENTO RÍGIDO.



**Fuente:** Departamento de ingeniería civil universidad de Piura.

### 2.4.1. 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. Se considera como la cimentación del pavimento y una de sus

funciones principales es la de soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, así como evitar que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías.

Los materiales que pueden ser empleados como subrasante serán de preferencia materiales de tipo granular, tales como: GW, GP, SW, SM, ML o incluso SC, siempre que la arcilla no sea de alta plasticidad.

#### **2.4.2. SUBBASE.**

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 subbase.

La subbase debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento. Se utiliza además como capa de drenaje y controlar la ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares. Al haber capilaridad en época de heladas, se produce un hinchamiento del agua, causado por el congelamiento, lo que produce fallas en el pavimento, si éste no dispone de una subrasante o subbase adecuada.

Entre otras funciones que debe cumplir la capa subbase es de incrementar el módulo (K) de reacción de la subrasante, proporcionar una plataforma de trabajo para los equipos de construcción.

#### **2.4.3. LOSA DE HORMIGÓN.**

La capa de rodadura del pavimento rígido se elabora de concreto material conformado por una mezcla homogénea de cemento, agregados, agua y en algunos casos aditivos. El concreto tiene características de resistencia a la compresión y en menor grado a la tensión. A la resistencia a compresión se la conoce comúnmente con el símbolo  $f'c$  y a la resistencia a flexión se la conoce como módulo de rotura o MR.

Los métodos de diseño especifican diseños de mezcla con Módulo de Rotura a la Flexión (MR) superiores a 42 Kg/cm<sup>2</sup>, o su equivalente a  $f'c = 280$  Kg/cm<sup>2</sup>. Aunque

las metodologías de diseño podrían evaluar pavimentos de concreto con MR mayores a 50 kg/cm<sup>2</sup>, lo mejor es no superar esta medida ya que las losas se vuelven muy rígidas. Además, los altos contenidos de cementante utilizados en mezclas de concreto de este tipo traen consigo problemas de contracción y fisuración por contracción plástica que pueden evitarse.

Bajo las cargas de tránsito, las losas de concreto están sometidas tanto a esfuerzos de tensión como de compresión. La relación esfuerzo/resistencia controla el desempeño del material y el número de cargas de tránsito que se podrán aplicar durante su periodo de diseño. Debido a que la resistencia a tensión es muy baja, esta se convierte en el punto crítico para el análisis de esfuerzos.

### ➤ CALIDAD DEL HORMIGÓN.

Las mezclas de concreto hidráulica para pavimentos deben de estar previstas para:

- Garantizar una durabilidad satisfactoria dentro de las condiciones de requerimiento del pavimento.
- Para asegurar la resistencia deseada a la flexión.

La flexión en los pavimentos de concreto hidráulico, bajo las cargas aplicadas por los neumáticos, produce esfuerzos de compresión y tensión. Los esfuerzos de compresión son pequeños en relación a la resistencia de la misma, y sin mayor incidencia en el espesor de la losa.

## 2.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS.

El hormigón se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento agua y agregados, los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo.

Las propiedades que presentan el hormigón en estado fresco y endurecido difieren una de otra, de igual forma los fenómenos como la retracción, la temperatura, características mecánicas, reológicas (relación entre el esfuerzo y la deformación) y durabilidad del hormigón.

### ➤ **RESISTENCIA A COMPRESIÓN**

La resistencia a compresión simple es la característica mecánica más importante de un hormigón. Su determinación se efectúa mediante el ensayo de probetas. El concepto de resistencia característica se refiere, a la resistencia a compresión medida sobre la probeta cilíndrica 15 x 30 de veintiocho días de edad, fabricadas, conservadas y rotas según método normalizados, pero puede hacerse extensivo a cualquier tipo de ensayo, clase de probeta, modo de conservación y edad del hormigón, ya que se trata de una definición de tipo estadístico. Siempre que se hable de resistencia característica nos referimos a la primera definición, salvo advertencia en contrario.

### ➤ **RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL HORMIGÓN**

Para ciertos elementos de hormigón, como en el caso de pavimentos, puede ser más interesante el conocimiento de la resistencia a tracción que la de compresión, por reflejar mejor ciertas cualidades, como la calidad y limpieza de los áridos.

La resistencia a tracción que ofrece un hormigón se puede definir como el esfuerzo inverso al de compresión, que actúa de forma paralela a la línea axial mayor de un elemento sometido a alguna acción o sollicitación de carga.

## **2.6.VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS**

Las variables que se toman en cuenta en este punto son las variables requeridas por el método que utiliza el software que es el del PCA, estas variables están mejor especificadas teóricamente en el libro AASHTO (1993).\*

### ➤ **TIEMPO**

Se consideran dos variables: período de análisis y vida útil del pavimento. La vida útil se refiere al tiempo transcurrido entre la puesta en operación del camino y el momento en el que el pavimento requiera rehabilitarse, es decir, cuando éste alcanza un grado de serviciabilidad mínimo. El período de análisis se refiere al período de tiempo para el cual va a ser conducido el análisis, es decir, el tiempo que puede ser cubierto por

---

\* AASHTO (1993) Pp. 13, 14, 19-22.

cualquier estrategia de diseño. Para el caso en el que no se considere rehabilitaciones, el período de análisis es igual al período de vida útil; pero si se considera una planificación por etapas, es decir, una estructura de pavimento seguida por una o más operaciones de rehabilitación, el período de análisis comprende varios períodos de vida útil, el del pavimento y el de los distintos refuerzos.

Para efectos de diseño se considera el período de vida útil, mientras que el período de análisis se utiliza para la comparación de alternativas de diseño, es decir, para el análisis económico del proyecto.

### ➤ **TRÁNSITO.**

En el método AASHTO los pavimentos se proyectan para que éstos resistan determinado número de cargas durante su vida útil. El tránsito está compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes que producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, lo cual origina distintas fallas en éste. Para tener en cuenta esta diferencia, el tránsito se transforma a un número de cargas por eje simple equivalente de 18 kips (80 kN) ó ESAL (Equivalent Single Axle Load), de tal manera que el efecto dañino de cualquier eje pueda ser representado por un número de cargas por eje simple.

La información de tráfico requerida por la ecuación de diseño utilizado en este método son: cargas por eje, configuración de ejes y número de aplicaciones.

Para la estimación de los ejes simples equivalentes (ESALs), se debe tener en cuenta los siguientes conceptos:

#### **Factor equivalente de carga (LEF, por sus siglas en ingles).**

La conversión se hace a través de los factores equivalentes de carga (Fec), que es el número de aplicaciones ESALs aportadas por un eje determinado. Así, el Fec es un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por la carga de un eje estándar de 18 Kips y la carga producida por otro tipo de eje.

Por ejemplo, la aplicación de un eje simple de 12 kips causa un daño aproximadamente igual a 0.23 aplicaciones de una carga por eje simple de 18 kips, por lo tanto se

necesitan cuatro aplicaciones de un eje simple de 12 kips para provocar el mismo daño (o reducción de la serviciabilidad), que el de una aplicación de un eje simple de 18kips.

➤ **MÓDULO DE ROTURA DEL CONCRETO (MR).**

Es un parámetro muy importante como variable de entrada para el diseño de pavimentos rígidos, ya que va a controlar el agrietamiento por fatiga del pavimento, originado por las cargas repetitivas de camiones. Se le conoce también como resistencia a la tracción del concreto por flexión.

El módulo de rotura requerido por el procedimiento de diseño es el valor medio determinado después de 28 días utilizando el ensayo de carga en los tercios. De esta manera, se obtiene en el tercio medio una zona sometida a un momento flector constante igual a  $PL/3$  y la rotura se producirá en cualquier punto de este tercio medio con la única condición que exista allí una debilidad. Este ensayo es recomendable frente al ensayo de carga en el punto medio, en el cuál la rotura se producirá indefectiblemente en dicho punto (punto de aplicación de la carga) donde el momento flector es máximo.

➤ **MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE (K).**

Este factor nos da idea de cuánto se asienta la subrasante cuando se le aplica un esfuerzo de compresión. Numéricamente, es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada sobre un área de carga, dividido por la deflexión en pulgadas para esa carga. Los valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada por pulgada (pci).

Puesto que la prueba de carga sobre placa, requiere tiempo y es costosa, el valor de k es estimado generalmente por correlación con otros ensayos simples, tal como la razón de soporte california (CBR) o las pruebas de valores R. El resultado es válido porque no se requiere la determinación exacta del valor k; las variaciones normales para un valor estimado no afectarán apreciablemente los requerimientos de espesores del pavimento.

## **2.7. ENSAYOS REQUERIDOS.**

### **2.7.1. CONO DINÁMICO DE PENETRACIÓN (DCP).**

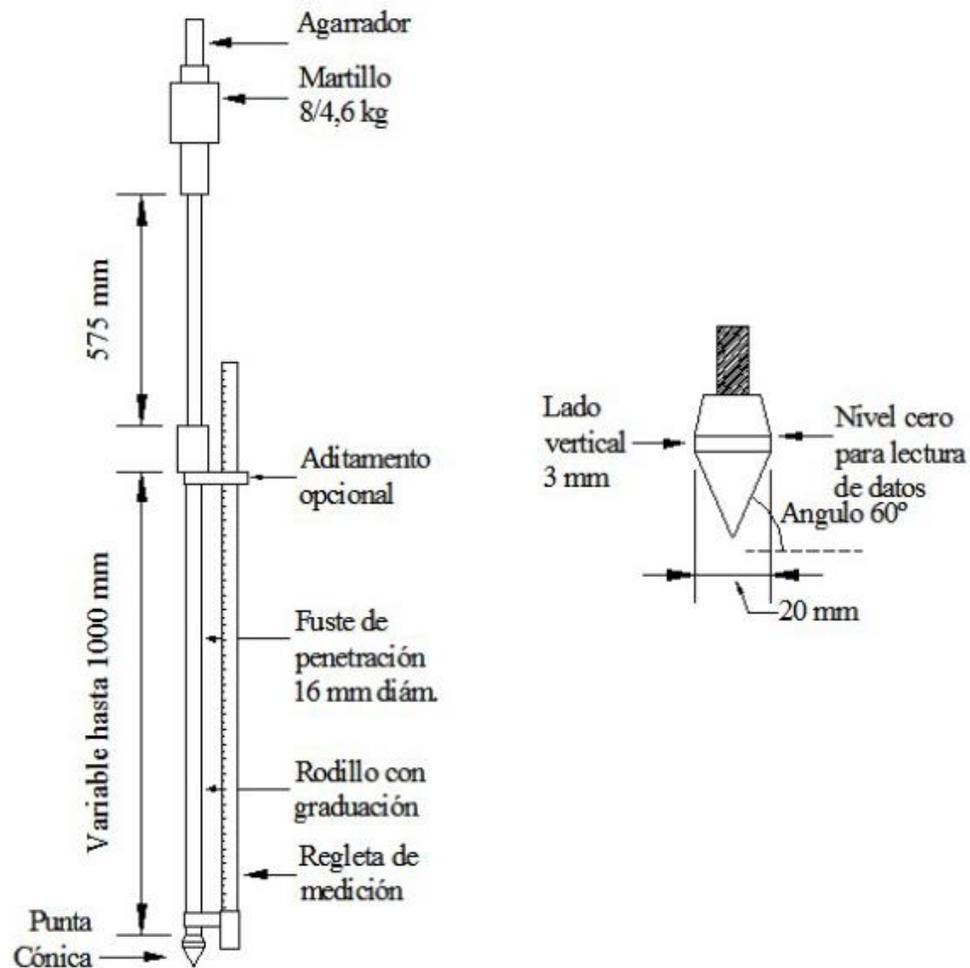
La determinación del Valor de Soporte California, CBR, parámetro aplicado en el diseño de pavimentos, en general es considerada como un proceso complejo que adicionalmente requiere de bastante tiempo para su obtención. Como respuesta a estas dificultades surgen diferentes dispositivos como el DCP (Cono Dinámico de Penetración) que facilitan y proporcionan mayor practicidad a los ensayos convencionales. El DCP es una herramienta útil, multifuncional, su uso trae una gama de beneficios. Sin embargo, es necesaria una buena interpretación para determinar parámetros de diseño finales más confiables, optimizando tiempo, dinero, recursos humanos y mecánicos. (Viscarra A., F. 2005) <sup>7</sup>

Este instrumento es utilizado esencialmente para evaluar la resistencia de suelos tanto no disturbados como compactados y estimar un valor de CBR en campo. A diferencia de este último, el DCP presenta ventajas como su simplicidad y economía de uso. Implícitamente, el DCP estima la capacidad estructural de las diferentes capas que conforman a un pavimento, detecta simultáneamente el grado de heterogeneidad que puede encontrarse en una sección y la uniformidad de compactación del material, de una manera rápida, continua y bastante precisa.

#### 1) Especificaciones geométricas del DCP

Recientemente la ASTM publicó una metodología estándar para el uso y aplicación del DCP en pavimentos, con la designación: D-6951-03. Este ensayo utiliza un DCP basado en el dimensionamiento de Sowers, con un martinete de 8 kg el cual tiene una caída libre de 575 mm y un cono intercambiable en la punta con un ángulo de 60° y un diámetro de 20 mm.

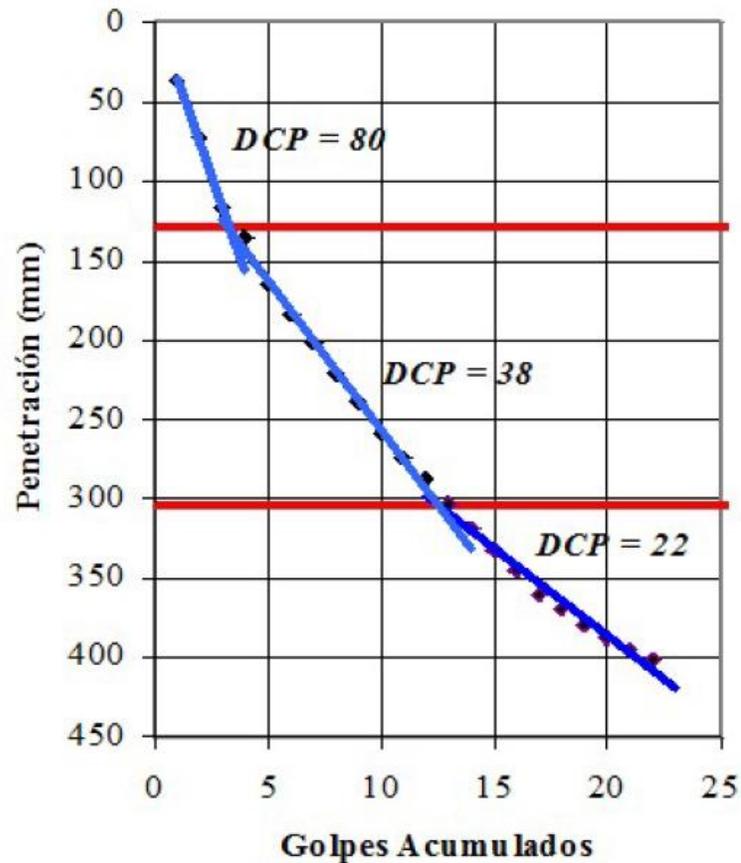
**Ilustración 7: ESQUEMA DEL EQUIPO DCP.**



**Fuente:** Cono dinámico de penetración y su aplicación en las evaluaciones de suelos.

## 2) Curva DCP

Gráfica que representa la penetración acumulada en función del número de golpes acumulados para los respectivos datos. En este tipo de curvas, como se muestra en la siguiente ilustración se puede visualizar el número de capas existentes representadas por rectas de diferentes pendientes, también se puede determinar el espesor de dichas capas.

**Ilustración 8: CURVA DCP.**

**Fuente:** Cono dinámico de penetración y su aplicación en las evaluaciones de suelos.

### 3) Número DCP

Este número representa la penetración obtenida por golpe y se expresa en mm/golpe; es el valor de la pendiente de la curva DCP para la capa en estudio, mientras más vertical sea la gradiente, menor será la resistencia del suelo.

Asimismo, esta medida de penetración describe la resistencia promedio de un suelo a través de cierta profundidad alcanzada, la cual se determina como el trabajo realizado por el suelo para detener el cono de penetración, dividido entre la distancia de penetración.

#### 4) Diagrama estructural

Con posibles propósitos de aplicación al diseño de pavimentos, Transvaal Roads Department-TPA (1978) desarrolló un conjunto de curvas directrices que indican la capacidad de soporte de pavimentos sometidos a condiciones de tráfico ligeras, medianas y severas. Por lo tanto, se puede comparar cualquier sondeo de DCP con las directrices mencionadas para estimar la profundidad a la cual el material natural actúa como un elemento estructural en el pavimento.

#### 5) Correlaciones existentes para el DCP

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes investigaciones para correlacionar el valor DCP con otras características físico-mecánicas de los suelos; la selección apropiada de este tipo de correlaciones está relacionada con el juicio del profesional en el área y las especificaciones del equipo DCP. La siguiente tabla resume las expresiones más trascendentales obtenidas con el uso del DCP (equipo normado según ASTM).

**Tabla 1: RELACIONES ENTRE DCP.**

Relación entre DCP(mm/golpe) y:	Ecuación	Autor/Autores	Observaciones
Límite Líquido (%)	$LL = 0,62 \cdot \text{Log}(DCP)^{1,14}$	Gabr, M. et al. (2001)	Suelo con alto contenido de finos (60%).
Grado de Saturación (%)	$S = 1 - e^{-0,065 \cdot DCP}$	Gabr, M. et al. (2001)	Suelo con alto contenido de finos (60%).
Valor de Soporte California (CBR %)	$\text{Log}(CBR) = 2,465 - 1,12 \cdot \text{Log}(DCP)$ o expresada también: $CBR = \frac{292}{DCP^{1,12}}$	Van Vuren (1968), Kleyn (1975), Livneh e Ishai (1987), Webster (1992) y Siekmeier (1999).	Apta para todo tipo de suelos (granulares y cohesivos).
Valor de Soporte California (%)	$\text{Log}(CBR) = 2,317 - 0,858 \cdot \text{Log}(DCP)$	Transport Road Research TRRL (1986).	Apta para todo tipo de suelos.
Valor de Soporte California (%)	$CBR = \frac{1}{0,002871 \cdot DCP}$	Webster S.L. et al. (1994).	Para suelos CH.
Valor de Soporte California (%)	$CBR = \frac{1}{(0,017019 \cdot DCP)^2}$	Webster S.L. et al. (1994).	Para suelos CL con CBR < 10 %.
Módulo Resiliente (Mpa)	$MR = 537,76 \cdot DCP^{-0,6645}$	Chen D. et al. (2005).	Estudio realizado en bases y sub-bases de diferentes autopistas de Estados Unidos.
Relación entre DCP(mm/golpe) y:	Ecuación	Autor/Autores	Observaciones
Módulo Resiliente (Mpa)	$MR = 532,1 \cdot DCP^{-0,492}$	George y Uddin (2000).	Suelos finos.
Módulo Resiliente (Mpa)	$MR = 235,3 \cdot DCP^{-0,475}$	George y Uddin (2000).	Suelos gruesos.
Compresión No Confinada (kPa)	$\text{Log}(UCS) = 3,29 - 0,809 \cdot \text{Log}(DCP)$	McElvaney y Djatnika (1991).	Suelos con limos.

**Fuente:** Cono dinámico de penetración y su aplicación en las evaluaciones de suelos.

### **2.7.2. EXTRACCIÓN Y FALLA DE NÚCLEOS DE CONCRETO.**

En este ensayo se aplica a la extracción de núcleos cilíndricos de concreto obtenidos a partir de estructuras existentes. Este núcleo se falla a compresión para determinar la resistencia del concreto de la estructura.

El ensayo permite la evaluación de la resistencia del concreto a partir de especímenes representativos obtenidos por extracción. Esta evaluación se realiza cuando se desea conocer la resistencia a la compresión del concreto de una estructura existente.

La resistencia de los núcleos de concreto depende del grado de humedad al que está sometido, de la orientación hacia la cual fue extraído, de la ubicación del núcleo.

En general no existe una relación estandarizada entre la resistencia del núcleo de concreto y la resistencia de los especímenes curados bajo el método estándar.

Núcleos (cilindros) de concreto cuyo diámetro depende del espesor de los elementos de concretos de los cuales se van a extraer y de la distribución del acero de refuerzo que allí se encuentre. El muestreo se realiza con taladros equipados con brocas de punta de diamante de diferentes diámetros. (Administradora Boliviana de carreteras 2015)<sup>8</sup>

#### **➤ PROCEDIMIENTO.**

En la zona donde será extraído el núcleo se procede a determinar la distribución de acero de refuerzo existe de manera que en el momento de la perforación no se atravesase ninguna barra. El taladro se coloca de manera perpendicular a la superficie donde será extraído el núcleo y se inicia el proceso de corte. Una vez que extraído el núcleo, este se mide y se registra cualquier peculiaridad que esté presente. Ya en el laboratorio se procede a cortar los extremos del núcleo de manera que su longitud cumpla con una relación 2 a 1 con el diámetro. El espécimen se acondiciona por 5 cinco días antes de que se realice el ensayo de compresión.

Éste tipo de evaluación se fundamenta en la toma de muestras representativas de los materiales que conforman las diferentes capas del pavimento en una vía.

En el programa de ubicación del muestreo debe tomarse en cuenta el patrón de fallas identificadas en el pavimento con el objeto de asegurar que las condiciones

significativas del pavimento sean consideradas, lo cual no implica que serán los sitios problemáticos los únicos a ser muestreados, ya que como se indicó el objeto de la exploración es conocer, a lo largo de la vía, cuál es la estructura característica.

En el caso de las capas asfálticas, las mismas son normalmente extraídas a través de equipos de perforación para la toma de núcleos de capas (asfálticas y concreto hidráulico), conocidos por su denominación en inglés con el nombre de Core-drill, de aspecto similar al de la figura adjunta. A través de la extracción de muestras de capas asfálticas es posible conocer el espesor de la(s) carpeta(s) o sub-capas que conforman el espesor de total de la(s) capa(s) asfáltica(s), además se puede identificar los diferentes tipos de mezcla empleados en la construcción y en eventuales trabajos de mantenimiento y rehabilitación ejecutados, así como su condición, siendo posible identificar la presencia de fallas.

**Ilustración 9:** EQUIPO PARA EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS.



**Fuente:** Manual de evaluación de pavimentos.

**CAPÍTULO III**

**PAVIMENTOS RÍGIDOS PROPIEDADES Y**

**CARACTERÍSTICAS**

## **CAPÍTULO III: DIMENSIONAMIENTO EN PAVIMENTOS RÍGIDOS Y EL PCA-CÁLCULO.**

### **3.1. MÉTODOS TRADICIONALES DE DIMENSIONAMIENTO.**

#### **3.1.1. MÉTODO H.M. WESTERGAARD.**

Según Crespo Villalaz (1996) en su libro *vías de comunicación*<sup>9</sup> dice que los pavimentos de concreto hidráulico o pavimentos rígidos, difieren de los pavimentos de asfalto o pavimentos flexibles, primero en que poseen una resistencia considerable a la flexión, y segundo, en que son afectados grandemente por los cambios de temperatura.

Los pavimentos de concreto hidráulico están sujetos a los esfuerzos siguientes:

- a) Esfuerzos abrasivos causados por las llantas de los vehículos.
- b) Esfuerzos directos de compresión y cortamiento causados por las cargas de las ruedas.
- c) Esfuerzos de compresión y tensión que resultan de la deflexión de las losas bajo las cargas de las ruedas.
- d) Esfuerzos de compresión y tensión causados por la expansión y contracción del concreto.
- e) Esfuerzos de compresión y tensión debidos a la combadura del pavimento por efectos de los cambios de temperatura.

En virtud de estar los pavimentos rígidos sujetos a los esfuerzos ya anotados, es notorio que para que estos pavimentos cumplan en forma satisfactoria y económica la vida útil que de ellos se espera, es necesario que su proyecto esté basado en los factores siguientes:

- a) Volumen, tipo y peso del tránsito a servir en actualidad y en un futuro previsible.
- b) Valor relativo de soporte y características de la subrasante.
- c) Clima de la región.
- d) Resistencia y calidad del concreto a emplear.

Si en el proyecto de estos pavimentos no se toma en cuenta alguno de los puntos mencionados, el pavimento no será económico. Así, por ejemplo, si los espesores de

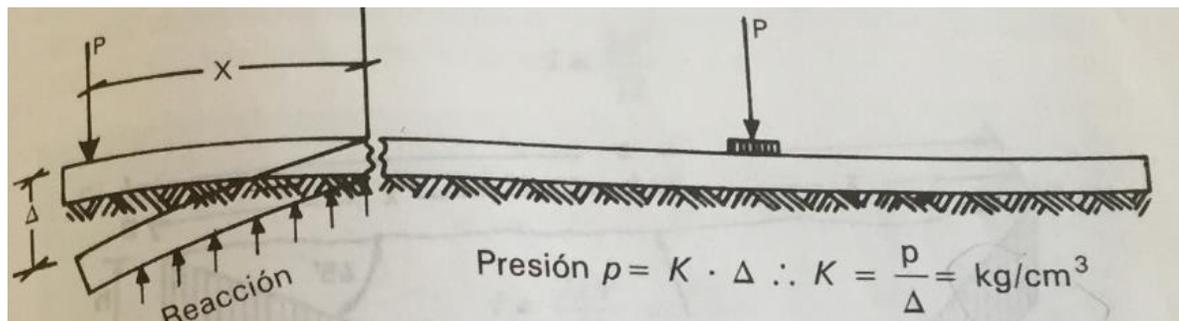
las losas de concreto son muy elevados, es decir, que su capacidad de carga es superior a la que realmente soporta, su comportamiento será satisfactorio, pero su costo de construcción será excesivo. Por el contrario, si los espesores son menores que los requeridos para las cargas que soportara, se acortara su vida de servicio o tendrá un costo de conservación muy alto y por lo tanto antieconómico y con un comportamiento poco satisfactorio.

El conocimiento del volumen y las características de tránsito actual y del previsible son necesarios para poder fijar el número y el ancho de las vías requeridas para satisfacerlo, y el peso de las cargas por rueda son imprescindibles para el cálculo de los espesores de las losas. La mención de estos factores señala la obligación que asiste al proyectista de hacer los mayores esfuerzos para reunir los datos del tránsito, siendo de particular importancia la obtención de datos relativos a las cargas de rueda, especialmente a las predominantes, en la forma más exacta posible, por cuanto de ello dependerá el acierto de su proyecto. La forma más segura consiste en efectuar censos de tránsito del mismo camino, cuyos datos relativos a camiones y autobuses deberán clasificarse de acuerdo con sus pesos por eje, encasillando en columnas separadas, en cantidad y en porcentaje sobre el total, los ejes determinado peso.

La realización previa de los censos de tránsito no deja de ser dificultosa cuando debe ser determinado estimando el tránsito futuro. En este caso deberá hacerse un estudio de las características comerciales, turísticas, etc., de la región que va a servir al camino, densidad de población, vinculación de la carretera con otras existentes y el estudio de los volúmenes de tránsito y cargas de ruedas sobre caminos de igual importancia existentes en otras zonas. El análisis se completa reuniendo información sobre la existencia de fábricas, minas, etc., cuyo tránsito pueda valorarse y que va a fluir sobre el nuevo camino o que existiendo sobre la zona de influencia del camino que sirve como término de comparación, no corresponda prever en la ruta en estudio y que, por lo tanto, constituyan un factor que altere la presunta correspondencia de los tránsitos respectivos.

En cuanto a los esfuerzos debidos a las cargas se puede decir que los de flexión son los más importantes en las losas. Tanto los estudios teóricos como los ensayos de losas han demostrado que el punto crítico de una losa de espesor uniforme, es decir, aquel en que para una carga dada se desarrollan esfuerzos más elevados, es el correspondiente a la esquina de la misma, o sea el ángulo formado por un borde exterior y una junta transversal tal como se ve en la siguiente ilustración:

**Ilustración 10: FLEXIÓN EN LOSA.**



**Fuente:** Vías de comunicación. Crespo Villalaz.

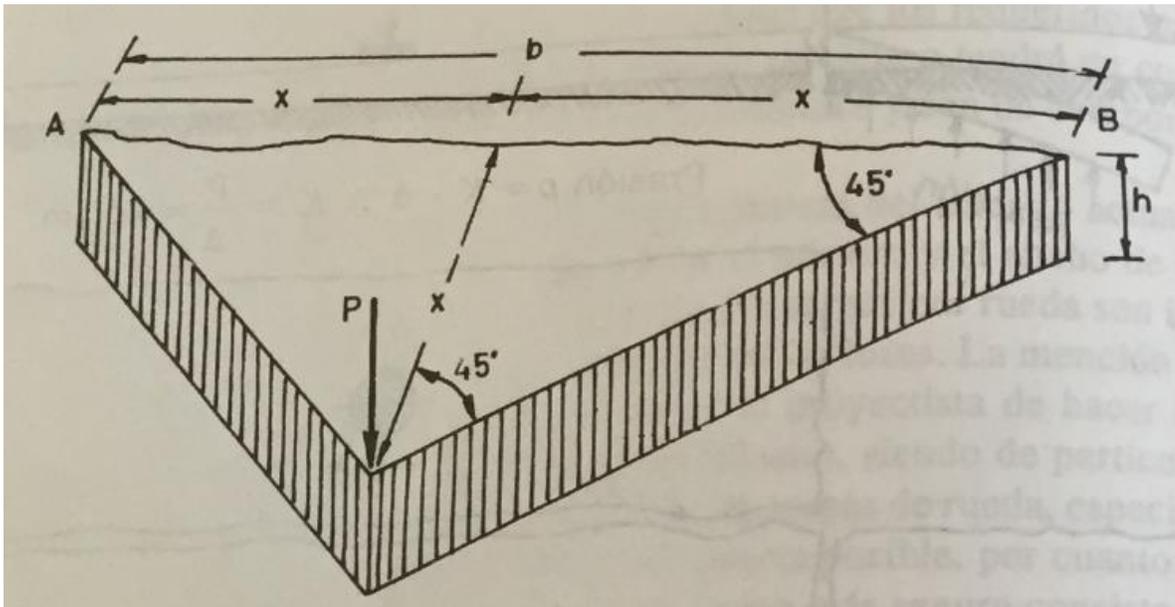
Los esfuerzos que provoca la misma carga  $P$  colocada sobre un borde de la losa suficientemente alejada de la esquina, y en el centro de la misma son de una magnitud de orden decreciente con respecto a los que se manifiestan en la esquina, correspondiendo el menor valor para la posición de la carga en el centro de la losa. Cuando el esfuerzo total es superior al módulo de ruptura del concreto, la losa se rompe. La observación de los pavimentos de concreto hidráulico en servicio lleva a las mismas comprobaciones, es decir, que el punto crítico es la esquina de las losas.

### 3.1.1.1. DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.

El ingeniero Clifford Older fue, probablemente, el primero que diseñó pavimentos de concreto hidráulico, basando sus análisis en que el pavimento era una estructura capaz de resistir ciertas cargas y que el punto crítico del mismo lo constituía la esquina. El procedimiento seguido por dicho investigador fue el siguiente:

Considérese una carga  $P$  aplicada en la intersección de una junta y la arista del pavimento rígido. Al aplicar la carga  $P$  a la losa, esta tiende a romperse según la línea A-B a una distancia  $x$  de la esquina.

**Ilustración 11:** CARGA APLICADA EN LA LOSA.



**Fuente:** Vías de comunicación. Crespo Villalaz.

Posteriormente varios investigadores ha propuesto fórmulas que ha significado un gran progreso con respecto a la que ya se ha indicado, siendo el más conocido y el que ha sido generalmente adoptado por los proyectistas, el análisis matemático desarrollado por el Dr. H.M. Westergaard, quien estudio los esfuerzos producidos por las cargas de ruedas colocadas en la esquina, en el borde a cierta distancia de la esquina, y en el centro de las losas.

Como conclusión de sus análisis teóricos, el Dr. Westergaard dedujo formulas semiempiricas para calcular el esfuerzo provocado por las cargas, y además, otra fórmula para calcular el esfuerzo causado por la diferencia de temperaturas.

Las fórmulas de Dr. Westergaard significaron un gran progreso, como ya se ha indicado, con respecto a la primitiva de Older porque tome en cuenta el área de la distribución de las cargas de ruedas sobre un circulo cuya área es equivalente a la

correspondiente de apoyo de las ruedas sobre el pavimento y, además, toma en cuenta la reacción de la subrasante.

La fórmula propuesta por el Dr. Westergaard, para el caso crítico de esquina que es el que más interesa, es el siguiente:

**Ecuación 6: FORMULA WESTERGARD**

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

**Fuente:** Vías de comunicación. Crespo Villalaz.

Donde:

S = Esfuerzo provocado en la losa por la carga P, en  $\frac{kg}{cm^2}$ .

P = Carga en kg que se aplica a la esquina de la losa.

a = Radio del circulo de área equivalente al área cargada, en centímetros.

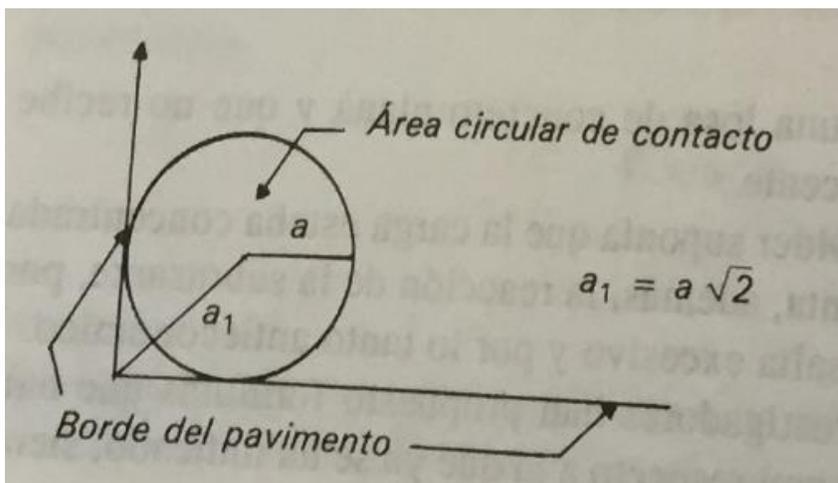
$\iota$  = Radio de rigidez relativa entre losa y subrasante, en centímetros, que vale:

**Ecuación 7: RADIO DE RIGIDEZ.**

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

**Fuente:** Vías de comunicación. Crespo Villalaz.

### Ilustración 12: ÁREA CIRCULAR DE CONTACTO.



**Fuente:** Vías de comunicación. Crespo Villalaz.

E = Modulo de elasticidad del concreto en  $\frac{kg}{cm^2}$ .

$\mu$  = Coeficiente de Poisson para el concreto con un valor medio de 0.15.

K = Módulo de reacción de la subrasante en  $\frac{kg}{cm^2}$ ; representa la presión necesaria en  $\frac{kg}{cm^2}$  que debe aplicarse sobre un área circular (cuyo diámetro estará comprendido entre 15 y 76 cm) para producir un hundimiento de 1.27 cm.

#### 3.1.2. METODO PCA.

Según el libro de la PCA (1995)\* seleccionamos el tipo de pavimento de hormigón (pavimento simple con ó sin pasajuntas, pavimento reforzado con juntas con pasajuntas, o pavimento continuamente reforzado), tipo de subbase si es necesaria, y tipo de berma (con o sin berma de hormigón, sardinel y cuneta o sardinel integral); el espesor de diseño es determinado en base a los cuatro factores siguientes:

- a) Resistencia del hormigón a la flexión (módulo de rotura MR).
- b) Resistencia de la subrasante, ó subrasante y subbase combinadas (k).

---

\* PCA (1995). Pp. 4-9, 13.

- c) Los pesos, frecuencias, y tipos de cargas axiales de camión que el pavimento soportará.
- d) El periodo de diseño, que en éste y otros procedimientos usualmente es considerado como de 20 años, pudiendo ser más ó menos.

#### **3.1.2.1. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A LA FLEXIÓN.**

La resistencia del hormigón a la flexión es considerada en el procedimiento de diseño mediante el criterio de fatiga, que controla el agrietamiento del pavimento bajo las cargas repetitivas de camiones.

El pandeo de un pavimento de hormigón bajo cargas axiales produce esfuerzos de compresión y flexión. Sin embargo, las relaciones de los esfuerzos y resistencias de compresión son demasiado pequeños para influenciar en el diseño del espesor de la losa. La resistencia a la flexión es determinada mediante pruebas de módulo de rotura, realizadas usualmente sobre vigas de 6x6x30-pulg.

Las pruebas de módulo de rotura son comúnmente realizadas a los 7, 14, 28, y 90 días. Los resultados de prueba a los 7 y 14 días son comparados con los requerimientos de las especificaciones para control de trabajo y para determinar cuándo los pavimentos pueden ser abiertos al tráfico.

#### **3.1.2.2. SOPORTE DE LA SUBRASANTE Y SUBBASE.**

El soporte que proporciona la subrasante y la subbase, donde es usada; es el segundo factor en el diseño de espesores. El soporte de la subrasante y subbase es definido en términos del módulo de reacción de la subrasante (k) de Westergaard. Es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada sobre un área de carga (una placa de 30-pulg. de diámetro), dividido por la deflexión en pulgadas para esa carga. Los valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada, por pulgada (psi/pulg), es decir como libras por pulgada cúbica (pci). Los equipos y procedimientos para determinar los valores de k.

**Tabla 2:** EFECTO DE LA SUBBASE NO TRATADA SOBRE LOS VALORES K.

Valor k de la Subrasante pci	Valor k de la Subbase, pci			
	4 pulg.	6 pulg.	9 pulg.	12 pulg.
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

**Fuente:** Diseño de pavimentos método PCA.

**Tabla 3:** VALORES K DE DISEÑO PARA SUBBASES TRATADAS CON CEMENTO.

Valor k de la Subrasante pci	Valor k de la Subbase, pci			
	4 pulg.	6 pulg.	9 pulg.	10 pulg.
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	-

**Fuente:** Diseño de pavimentos método PCA.

Puesto que la prueba de carga sobre placa, requiere tiempo y es costosa, el valor de k es estimado generalmente por correlación con otros ensayos simples, tal como la Razón de Soporte de California (California Bering Ratio-CBR) o las pruebas de valores-R. El resultado es válido porque no se requiere la determinación exacta del valor k; las variaciones normales para un valor estimado no afectarán apreciablemente los requerimientos de espesores del pavimento.

No es económico usar subbases no tratadas con el sólo propósito de incrementar los valores de k. Donde sea usada una subbase, se producirá un incremento del valor k que puede ser usado en el diseño del espesor. Si la subbase es un material granular no tratado, el incremento aproximado del valor k puede ser tomado de la Tabla. Otros procedimientos que den una calidad equivalente de material pueden ser usados. Los

valores  $k$  de diseño para subbases tratadas con cemento y que reúnen los criterios antes señalados están dados en la tabla.

### **3.1.2.3. PERIODO DE DISEÑO.**

El término periodo de diseño es usado en este texto en vez de vida del pavimento, porque éste último no está sujeto a una definición precisa. Algunos ingenieros y agencias de carreteras consideran que la vida de un pavimento de hormigón finaliza cuando se coloca la primera sobrecapa. La vida de los pavimentos de hormigón pueden variar desde menos de 20 años en algunos proyectos con tráfico mayor de lo originalmente estimado o que han tenido defectos de diseño, materiales o construcción defectuosa; a más de 40 años en otros proyectos donde no existan defectos. El término periodo de diseño es considerado algunas veces como sinónimo del término periodo de análisis de tráfico. Debido a que el tráfico puede no ser predicho con mucha precisión para un periodo largo, comúnmente se utiliza un período de diseño de 20 años en procedimientos de diseño de pavimentos. Sin embargo, existen a menudo casos donde el uso de períodos de diseño más cortos o más largos, pueden ser económicamente justificados, tal como en una carretera de transporte especial que será usada sólo por pocos años, o una construcción muy cara donde se desea un alto nivel de servicio por un periodo largo, con escaso o sin mantenimiento.

El periodo de diseño seleccionado afecta al espesor de diseño, ya que determina cuántos años, y por lo tanto a cuántos camiones, debe servir el pavimento. La selección de un periodo de diseño para un proyecto específico está basado en criterios ingenieriles y en el análisis económico de los costos del pavimento y los servicios obtenidos en todo el periodo.

### **3.1.2.4. TRAFICO.**

La cantidad y los pesos de las cargas axiales pesadas esperadas durante la vida de diseño son los factores principales en el diseño de espesores de pavimentos de hormigón. Estos se derivan de las estimaciones de:

- Tráfico promedio diario en ambas direcciones, de todos los vehículos (average daily traffic-ADT)
- Tráfico promedio diario de camiones en ambas direcciones (average daily truck traffic-ADTT)
- Cargas axiales de camiones

Información sobre el ADT es obtenida de conteos especiales del tráfico o de mapas del volumen de tráfico del estado, del condado, o de ciudades. Este ADT es denominado como el ADT presente o corriente, el ADT de diseño es estimado por los métodos comúnmente usados discutidos aquí. Sin embargo, cualquier otro método que dé una estimación razonable del tráfico esperado durante la vida de diseño puede ser utilizado.

➤ **PROYECCION.**

Un método para obtener el dato del volumen de tráfico (ADT de diseño), requiere el uso de las tasas anuales del crecimiento de tráfico y factores de proyección del tráfico. Muestra las relaciones entre las tasas anuales de crecimiento y los factores de proyección para períodos de diseño de 20 y 40 años. En un problema de diseño, el factor de proyección es multiplicado por el ADT presente para obtener el ADT de diseño que representa el valor promedio para el período de diseño. En algunos procedimientos, éste es llamado el promedio anual del tráfico diario (average annual daily traffic - AADT).

➤ **FACTORES DE SEGURIDAD DE CARGA.**

En el procedimiento de diseño, las cargas por eje determinadas en la sección previa, son multiplicadas por un factor de seguridad de carga (Load Safety Factor LSF). Recomendándose los siguientes factores:

- Para proyectos Interestatales y otros de múltiples carriles donde el flujo de tráfico será ininterrumpido y donde habrán altos volúmenes de tráfico de camiones, LSF = 1.2.
- Para carreteras y calles arteriales donde el volumen de tráfico de camiones será moderado, LSF = 1.1.

- Para carreteras, calles residenciales, y otras que soportarán pequeños volúmenes de tráfico de camiones, LSF 1.0.

### 3.1.3. MÉTODO AASHTO-93.

Continuando con AASHTO (1993)\*, Para este método el diseño del pavimento rígido involucra el análisis de diversos factores: espesor, tráfico, drenaje, clima, características de los suelos, propiedades del concreto, capacidad de transferencia de carga, nivel de serviciabilidad deseado y el grado de confiabilidad al que se desea efectuar el diseño acorde con el grado de importancia de la carretera. Todos estos factores son necesarios para predecir un comportamiento confiable de la estructura del pavimento y evitar que el daño del pavimento alcance el nivel de colapso durante su vida en servicio.

La ecuación fundamental AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos es:

#### Ecuación 8: FORMULA AASHTO 93.

$$\begin{aligned} \text{Log}(W_{18}) = & Z_R S_0 + 7,35 \text{Log}(D + 1) - 0,06 + \frac{\text{Log}\left(\frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5}\right)}{\frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{3,46}}} \\ & + (4,22 - 0,32Pt) \text{Log} \left( \frac{S'c Cd (D^{0,75} - 1,132)}{215,62 J \left[ \frac{18,42}{\left(\frac{Ec}{K}\right)^{0,25}} \right]} \right) \end{aligned}$$

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

Donde:

- $W_{18}$  = Numero de cargas de 18 kips (80 KN) previstas.
- $Z_R$  = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada, para una confiabilidad R.
- $S_0$  = Desviación estándar de todas las variables.

---

\* AASHTO (1993) Pp. 12-27

- $D$  = Espesor de la losa del pavimento en pulg.
- $\Delta PSI$  = Perdida de serviciabilidad prevista en el diseño.
- $P_t$  = Serviciabilidad final.
- $S'_c$  = Módulo de rotura del concreto en psi.
- $J$  = Coeficiente de transferencia de carga.
- $C_d$  = Coeficiente de drenaje.
- $E_c$  = Módulo de elasticidad del concreto, en psi.
- $K$  = Módulo de reacción de la subrasante (coeficiente de balastro), en pci (psi/pulg).

Para una mejor descripción de las variables, éstas se han clasificado de la siguiente manera:

- **Variables de diseño.** Esta categoría se refiere al grupo de criterios que debe ser considerado para el procedimiento de diseño. Considera la variable tiempo, tránsito y confiabilidad.
- **Criterio de comportamiento.** Representa el grupo de condiciones de fronteras especificado por el usuario, dentro del que una alternativa de diseño deberá comportarse. Considera la serviciabilidad.
- **Propiedades de los materiales para el diseño estructural.** Esta categoría cubre todas las propiedades de los materiales del pavimento y del suelo de fundación, requeridas para el diseño estructural. Considera el módulo de reacción de la subrasante ( $K$ ), módulo de rotura del concreto y módulo de elasticidad del concreto.
- **Características estructurales.** Se refiere a ciertas características físicas de la estructura del pavimento, que tienen efecto sobre su comportamiento. Considera el drenaje, tránsito de carga y pérdida de soporte.

### 3.1.3.1.VARIABLE DE DISEÑO

#### ➤ VARIABLE TIEMPO

Se consideran dos variables: período de análisis y vida útil del pavimento. La vida útil se refiere al tiempo transcurrido entre la puesta en operación del camino y el momento en el que el pavimento requiera rehabilitarse, es decir, cuando éste alcanza un grado de serviciabilidad mínimo. El período de análisis se refiere al período de tiempo para el cual va a ser conducido el análisis, es decir, el tiempo que puede ser cubierto por cualquier estrategia de diseño. Para el caso en el que no se considere rehabilitaciones, el período de análisis es igual al período de vida útil; pero si se considera una planificación por etapas, es decir, una estructura de pavimento seguida por una o más operaciones de rehabilitación, el período de análisis comprende varios períodos de vida útil, el del pavimento y el de los distintos refuerzos.

Para efectos de diseño se considera el período de vida útil, mientras que el período de análisis se utiliza para la comparación de alternativas de diseño, es decir, para el análisis económico del proyecto. Los períodos de análisis recomendados son mostrados en la siguiente tabla.

**Tabla 4:** PERIODO DE ANÁLISIS.

<b>CLASIFICACIÓN DE LA VÍA</b>	<b>PERÍODO DE ANÁLISIS (AÑOS)</b>
Urbana de alto volumen de tráfico	30 – 50
Rural de alto volumen de tráfico	20 – 50
Pavimentada de bajo volumen de tráfico	15 - 25
No pavimentada de bajo volumen de tráfico	10 – 20

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

### ➤ TRÁSITO.

En el método AASHTO los pavimentos se proyectan para que éstos resistan determinado número de cargas durante su vida útil. El tránsito está compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes que producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, lo cual origina distintas fallas en éste. Para tener en cuenta esta diferencia, el tránsito se transforma a un número de cargas por eje simple equivalente de 18 kips (80 kN) ó ESAL (Equivalent Single Axle Load), de tal manera que el efecto dañino de cualquier eje pueda ser representado por un número de cargas por eje simple.

La información de tráfico requerida por la ecuación de diseño utilizado en este método son: cargas por eje, configuración de ejes y número de aplicaciones.

Para la estimación de los ejes simples equivalentes (ESALs), se debe tener en cuenta los siguientes conceptos:

- a) Tasa de crecimiento.

Representa el crecimiento promedio anual del TMDA. Generalmente las tasas de crecimiento son diferentes para cada tipo de vehículo.

En base a las estadísticas es conveniente definir que curva se ajusta mejor al tránsito generado por una carretera.

- b) Factor de crecimiento.

Una forma sencilla de encontrar el factor de crecimiento es adoptar una tasa de crecimiento anual.

#### **Ecuación 9: FACTOR DE CRECIMIENTO.**

$$FC = \frac{(1 + r)^P - 1}{r}$$

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

- FC = Factor de crecimiento
- r = Tasa de crecimiento anual en decimales.

- P = Periodo de diseño en años.
- c) Tránsito de diseño.

Es el tránsito medio diario que se utiliza al momento de calcular el N° ESAL's

#### **Ecuación 10: TRANSITO DE DISEÑO**

$$TPDA = FC * TPD * 365$$

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

- TPDA = Tránsito promedio diario anual o tránsito de diseño.
- FC = Factor de crecimiento.
- TPD = Tránsito promedio diario.
- d) Factor equivalente de carga (LEF, por sus siglas en inglés)

La conversión se hace a través de los factores equivalentes de carga (Fec), que es el número de aplicaciones ESALs aportadas por un eje determinado. Así, el Fec es un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por la carga de un eje estándar de 18 Kips y la carga producida por otro tipo de eje.

#### **Ecuación 11: FACTOR EQUIVALENTE DE CARGA (LEF)**

$$LEF = \frac{\text{N° de ESALs de 80KN que produce una pérdida de serviciabilidad}}{\text{N° de ejes x KN que producen la misma pérdida de serviciabilidad}}$$

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

Por ejemplo, la aplicación de un eje simple de 12 kips causa un daño aproximadamente igual a 0.23 aplicaciones de una carga por eje simple de 18 kips, por lo tanto se necesitan cuatro aplicaciones de un eje simple de 12 kips para provocar el mismo daño (o reducción de la serviciabilidad), que el de una aplicación de un eje simple de 18 kips.

**Ecuación 12: NÚMERO DE CARGAS PREVISTAS.**

$$W_{18} = F_c * F_d * W_{18}'$$

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

- $W_{18}$  = Numero de cargas de 18 kips (80 KN) previstas.
- $F_d$  = Factor de distribución direccional (50% para la mayoría de las carreteras)  
En algunos casos puede variar de 0,3 a 0,7 dependiendo de la dirección que acumula mayor porcentaje de vehículos cargados.
- $F_c$  = Factor de distribución por carril.
- $W_{18}'$  = Ejes equivalentes acumulados en ambas direcciones.

**Tabla 5: FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL.**

No. carriles en c dirección	Porcentaje de ejes simples equivalentes 18 kips en el carril de diseño ( $F_c$ )
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4 ó más	50 – 75

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

➤ **CONFIABILIDAD.**

La confiabilidad es la probabilidad de que el pavimento se comporte satisfactoriamente durante su vida útil o período de diseño, resistiendo las condiciones de tráfico y medio ambiente dentro de dicho período. Cabe resaltar, que cuando hablamos del comportamiento del pavimento nos referimos a la capacidad estructural y funcional de éste, es decir, a la capacidad de soportar las cargas impuestas por el tránsito, y asimismo

de brindar seguridad y confort al usuario durante el período para el cual fue diseñado. Por lo tanto, la confiabilidad está asociada a la aparición de fallas en el pavimento.

Es fácil deducir que si el número de ESALs previstos es menor que el número de ESALs reales, la vida útil del pavimento se acortará. Por lo tanto, la variabilidad en el diseño, en la construcción afecta en gran medida la bondad de un diseño, por ejemplo:

- La variación en las propiedades de los materiales a lo largo del pavimento, produce como resultado una variación en el desarrollo de fallas y rugosidades en ese pavimento. Las fallas localizadas en zonas débiles, dan como resultado una disminución en la vida útil del pavimento.
- La variación de la ubicación de los pasadores en las juntas y profundidad de colocación de la armadura da como resultado una variación en el desarrollo de fallas y rugosidades.
- La variación entre los datos de diseño del pavimento y los reales puede significar un aumento o disminución de la vida útil del mismo.

Es por esto que se necesario una variable ( $S_0$  – Desviación Estándar) que acote la variabilidad de todos éstos factores dentro de unos límites permisibles, con el fin de asegurar que la estructura del pavimento se comporte adecuadamente durante su período de diseño.

La desviación estándar es la desviación de la población de valores obtenidos por AASHTO que involucra la variabilidad inherente a los materiales y a su proceso constructivo. En la siguiente tabla se muestran valores para la desviación estándar.

**Tabla 6:** VALORES PARA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR.

CONDICIÓN DE DISEÑO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR ( $S_0$ )	
	Pav. rígido	Pav. flexible
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito.	0.34	0.44
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito.	0.39	0.49

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

Una vez seleccionado el valor de “R” que el Proyectista considere adecuado, se busca el valor de ZR de la Tabla 12. Si el Proyectista carece de experiencia en el diseño, evidentemente, ya que mientras mayor sea el valor de “R” mayor será la “confianza” en el diseño, tratará de seleccionar los valores en el rango alto de la Tabla 16. El valor que representa a la “Confiabilidad” y que es llevado a la ecuación de diseño AASHTO-93 es, finalmente, el valor ZR.

**Tabla 7:** VALORES DE ZR PARA DIVERSOS GRADOS DE CONFIABILIDAD.

Confiabilidad (R)	Valor de ZR
50	- 0,000
60	- 0,253
70	- 0,524
75	- 0,674
80	- 0,841
85	- 1,037
90	- 1,282
91	- 1,340
92	- 1,405
93	- 1,476
94	- 1,555
95	- 1,645
96	- 1,751
97	- 1,881
98	- 2,054
99	- 2,327
99,9	- 3,090
99,99	- 3,750

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

El número de ESALs de diseño para una confiabilidad dada es:

**Ecuación 13:** ESTIMACIÓN NÚMERO ESALS.

$$\text{Log (ESALs diseño)} = \text{log NT} + \text{ZR} * \text{S0}$$

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

Donde ZR es el área bajo la curva de distribución, correspondiente a la curva estandarizada.

Para la selección del nivel de confiabilidad debe tenerse en cuenta:

Tiene que ver con el uso esperado de la carretera. Así, para carreteras principales el nivel de confiabilidad es alto, ya que un subdimensionamiento del espesor del pavimento traerá como consecuencia que éste alcance los niveles mínimos de serviciabilidad antes de lo previsto, debido al rápido deterioro que experimentará la estructura. En la tabla se dan niveles de confiabilidad aconsejados por la AASHTO.

**Tabla 8: NIVELES DE CONFIABILIDAD.**

**Niveles de Confiabilidad**

<b>Tipo de camino</b>	<b>Zona urbana</b>	<b>Zona rural</b>
Rutas interestatales y autopistas	85 – 99.9	80 – 99.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 99
Colectoras	80 – 95	75 – 95
Locales	50 – 80	50 – 80

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

### 3.1.3.2. CRITERIO DE COMPORTAMIENTO.

#### ➤ SERVICIABILIDAD

La serviciabilidad se usa como una medida del comportamiento del pavimento, la misma que se relaciona con la seguridad y comodidad que puede brindar al usuario (comportamiento funcional), cuando éste circula por la vialidad. También se relaciona con las características físicas que puede presentar el pavimento como grietas, fallas, peladuras, etc, que podrían afectar la capacidad de soporte de la estructura (comportamiento estructural).

El concepto de serviciabilidad está basado en cinco aspectos fundamentales resumidos como sigue:

- Las carreteras están hechas para el confort y conveniencia del público usuario.

- El confort, o calidad de la transitabilidad, es materia de una respuesta subjetiva de la opinión del usuario.
- La serviciabilidad puede ser expresada por medio de la calificación hecha por los usuarios de la carretera y se denomina la calificación de la serviciabilidad.
- Existen características físicas de un pavimento que pueden ser medidas objetivamente y que pueden relacionarse a las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento produce un índice de serviciabilidad objetivo.
- El comportamiento puede representarse por la historia de la serviciabilidad del pavimento.

Cuando el conductor circula por primera vez o en repetidas ocasiones sobre una vialidad, experimenta la sensación de seguridad o inseguridad dependiendo de lo que ve y del grado de dificultad para controlar el vehículo. El principal factor asociado a la seguridad y comodidad del usuario es la calidad de rodamiento que depende de la regularidad o rugosidad superficial del pavimento. La valoración de este parámetro define el concepto de Índice de Serviciabilidad Presente (PSI, por sus siglas en ingles).

El PSI califica a la superficie del pavimento de acuerdo a una escala de valores de 0 a 5. Claro está, que si el usuario observa agrietamientos o deterioros sobre la superficie del camino aún sin apreciar deformaciones, la clasificación decrece.

El diseño estructural basado en la serviciabilidad, considera necesario determinar el índice de serviciabilidad inicial (P0) y el índice de serviciabilidad final (Pt), para la vida útil o de diseño del pavimento.

a) Índice de serviciabilidad inicial (P0)

El índice de serviciabilidad inicial (P0) se establece como la condición original del pavimento inmediatamente después de su construcción o rehabilitación. AASHTO estableció para pavimentos rígidos un valor inicial deseable de 4.5, si es que no se tiene información disponible para el diseño.

b) Índice de serviciabilidad final (Pt)

El índice de serviciabilidad final (Pt), ocurre cuando la superficie del pavimento ya no cumple con las expectativas de comodidad y seguridad exigidas por el usuario. Dependiendo de la importancia de la vialidad, pueden considerarse los valores Pt indicados en la siguiente tabla.

**Tabla 9: ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL.**

<b>Pt</b>	<b>Clasificación</b>
3.00	Autopistas
2.50	Colectores
2.25	Calles comerciales e industriales
2.00	Calles residenciales y estacionamientos

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

La pérdida de serviciabilidad se define como la diferencia entre el índice de servicio inicial y terminal.

**Ecuación 14: SERVICIABILIDAD.**

$$\Delta\text{PSI} = P_0 - P_t$$

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

Los factores que influyen mayormente en la pérdida de serviciabilidad de un pavimento son: tráfico, medio ambiente y edad del pavimento. Los efectos que causan éstos factores en el comportamiento del pavimento han sido considerados en este método. El factor edad (tiempo) no está claramente definido. Sin embargo, en la mayoría de los casos es un factor negativo neto que contribuye a la reducción de la serviciabilidad. El efecto del medio ambiente considera situaciones donde se encuentran arcillas expansivas o levantamientos por helada. Así, el cambio total en el PSI en cualquier momento puede ser obtenido sumando los efectos dañinos del tráfico, arcillas expansivas y/o levantamientos por helada.

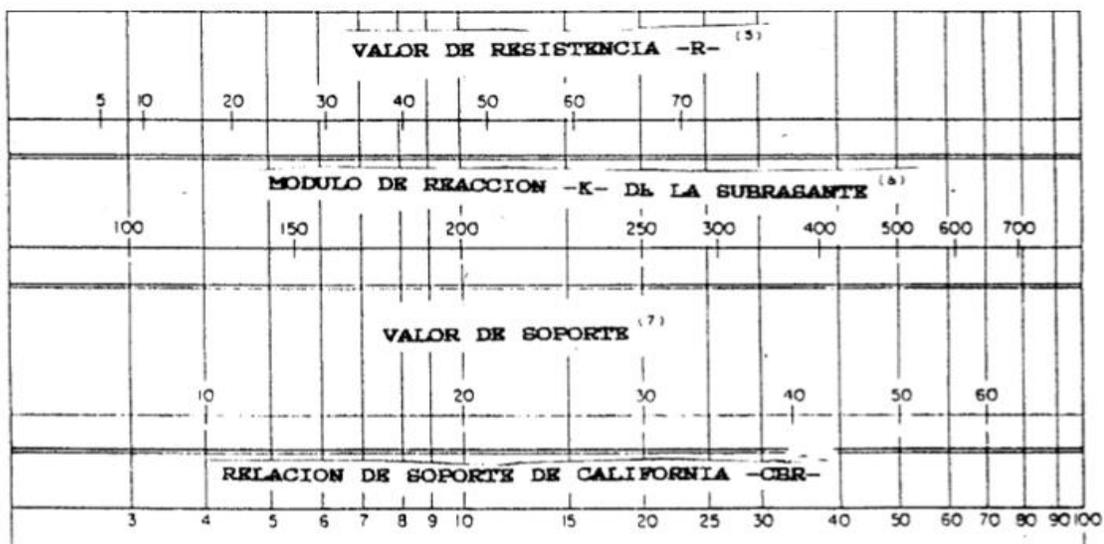
### 3.1.3.3. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

#### ➤ MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE (K).

Este factor nos da idea de cuánto se asienta la subrasante cuando se le aplica un esfuerzo de compresión. Numéricamente, es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada sobre un área de carga, dividido por la deflexión en pulgadas para esa carga. Los valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada por pulgada (pci).

Puesto que la prueba de carga sobre placa, requiere tiempo y es costosa, el valor de k es estimado generalmente por correlación con otros ensayos simples, tal como la razón de soporte californiana (CBR) o las pruebas de valores R. El resultado es válido porque no se requiere la determinación exacta del valor k; las variaciones normales para un valor estimado no afectarán apreciablemente los requerimientos de espesores del pavimento. Las relaciones de la figura son satisfactorias para propósitos de diseño.

#### Ilustración 13: RELACIÓN ENTRE K Y OTRAS PROPIEDADES DEL SUELO.



**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

En la Tabla 10 se tiene el aumento de k por la presencia de una subbase granular, siendo este incremento poco significativo, se exigen grandes espesores de la subbase.

**Tabla 10:** AUMENTO DE K DEBIDO A SUBBASE GRANULAR.

Valor de soporte de subrasante		Valor soporte sobre el sistema estructural (MPa/m), para espesor de base iguales a:			
CBR (%)	K (MPa/m)	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm
2	16	19	22	27	33
3	24	27	31	37	45
4	30	34	38	44	54
5	34	38	42	49	59
6	38	42	46	53	65
7	41	45	50	56	69
8	44	48	53	60	72
9	47	52	56	63	76
10	49	54	58	65	79
11	51	56	60	67	81
12	53	58	62	69	84
13	54	59	63	70	85
14	56	61	65	72	87
15	57	62	66	73	88
16	59	64	68	75	91
17	60	65	69	76	92
18	61	66	70	77	93
19	62	67	71	78	94
20	63	68	73	79	96

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

#### ➤ MÓDULO DE ROTURA DEL CONCRETO.

Es un parámetro muy importante como variable de entrada para el diseño de pavimentos rígidos, ya que va a controlar el agrietamiento por fatiga del pavimento, originado por las cargas repetitivas de camiones. Se le conoce también como resistencia a la tracción del concreto por flexión.

El módulo de rotura requerido por el procedimiento de diseño es el valor medio determinado después de 28 días utilizando el ensayo de carga en los tercios. De esta manera, se obtiene en el tercio medio una zona sometida a un momento flector constante igual a  $PL/3$  y la rotura se producirá en cualquier punto de este tercio medio con la única condición que exista allí una debilidad. Este ensayo es recomendable frente

al ensayo de carga en el punto medio, en el cuál la rotura se producirá indefectiblemente en dicho punto (punto de aplicación de la carga) donde el momento flector es máximo.

Estimación a través de la resistencia a compresión del concreto.

**Ecuación 15: MÓDULO DE ROTURA DEL HORMIGÓN.**

$$S_c' = K(fc')^{0,5} \quad 7 < K < 12$$

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

Donde:

$fc'$  = Resistencia a compresión del concreto en psi.

Los valores del módulo de rotura varían entre 2.8 MPa (400 psi) y 4.8 MPa (700 psi), llegando incluso a valores de 8.2 MPa (1200 psi), en concretos con alta resistencia inicial.

➤ **MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO.**

Es un parámetro que indica la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tiene una losa de pavimento. Es la relación entre la tensión y la deformación. Las deflexiones, curvaturas y tensiones están directamente relacionadas con el módulo de elasticidad del concreto. En los pavimentos de concreto armado continuo, el módulo de elasticidad junto con el coeficiente de expansión térmica y el de contracción del concreto, son los que rigen el estado de tensiones en la armadura. Para concreto de peso normal, el Instituto del Concreto Americano sugirió: Donde  $E_c$  y ' $fc'$  están dados en psi.

**Ecuación 16: MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO.**

$$E_c = 57000(fc')^{0,5}$$

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

### **3.1.3.4.CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES.**

#### **➤ DRENAJE.**

El proceso mediante el cual el agua de infiltración superficial o agua de filtración subterránea es removida de los suelos y rocas por medios naturales o artificiales, se llama drenaje. El drenaje es uno de los factores más importantes en el diseño de pavimentos.

El agua es el causante principal del deterioro de la estructura del pavimento, porque origina muchos efectos devastadores en él; siendo el peor, la pérdida de soporte del pavimento.

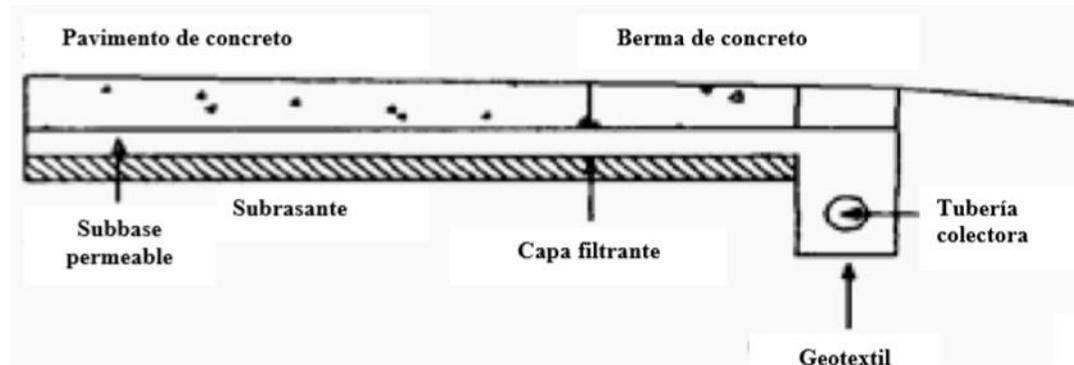
Para minimizar los efectos del agua sobre los pavimentos se debe:

- Prevenir el ingreso del agua al pavimento (drenaje superficial).
- Proveer de un drenaje para remover el agua rápidamente (drenaje subterráneo).
- Construir un pavimento suficientemente fuerte para resistir el efecto combinado de carga y agua.

Como es imposible impedir el ingreso del agua a la estructura del pavimento; es necesario la construcción de un sistema de subdrenaje que permita remover rápidamente esta agua. En la actualidad se están utilizando subbases altamente permeables y drenes laterales para evacuar rápidamente el agua. La sección típica de una subbase permeable con diferentes tipos de berma se muestra en las figuras.

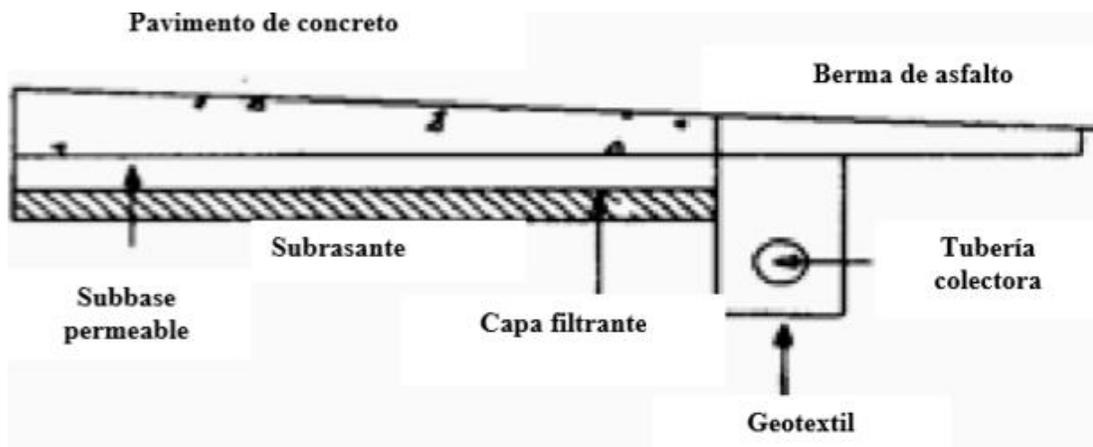
Los materiales de drenaje incluyen: agregados, geotextiles y tuberías. Los agregados se usan como capas de drenaje y drenes franceses o como material de filtro para sus protecciones. Los geotextiles son usados para reemplazar agregados como filtros. Las tuberías pueden ser perforadas, ranuradas o de junta abierta, siendo colocadas dentro de los drenes franceses para recolectar agua.

**Ilustración 14:** SECCIÓN DE UNA BASE PERMEABLE CON UNA BERMA DE CONCRETO.



**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

**Ilustración 15:** SECCIÓN DE UNA BASE PERMEABLE CON UNA BERMA DE ASFALTO.



**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

Los efectos del drenaje sobre el comportamiento del pavimento han sido considerados en el método AASHTO 93 por medio de un coeficiente de drenaje ( $C_d$ ). El drenaje es tratado considerando el efecto del agua sobre las propiedades de las capas del pavimento y sus consecuencias sobre la capacidad estructural de éste; y además el efecto que tiene sobre el coeficiente de transferencia de carga en pavimentos rígidos.

La siguiente tabla proporciona los valores recomendados por la AASHTO para el coeficiente de drenaje  $C_d$ , que depende de la propiedad con que cuentan las capas que

constituyen la estructura del pavimento para liberar el agua libre entre sus granos, en función del tiempo durante el cual la estructura del pavimento está expuesta normalmente expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación.

**Tabla 11: VALORES RECOMENDABLES DEL COEFICIENTE DE DRENAJE (CD).**

C <sub>d</sub>	Tiempo transcurrido para que el suelo libere el 50 % de su agua libre	Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento esta expuesta a niveles de humedad cercanas a la saturación.			
		< 1%	1 – 5 %	5 – 25 %	> 25 %
Excelente	2 horas	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1 día	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Regular	1 semana	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Pobre	1 mes	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy pobre	Nunca	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

#### ➤ TRANSFERENCIA DE CARGA

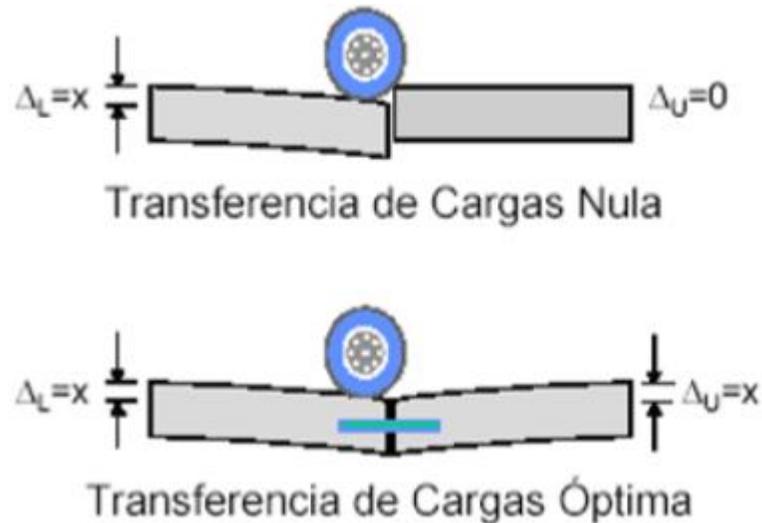
Las cargas de tránsito deben ser transmitidas de una manera eficiente de una losa a la siguiente para minimizar las deflexiones en las juntas. Las deflexiones excesivas producen bombeo de la subbase y posteriormente rotura de la losa de concreto.

El mecanismo de transferencia de carga en la junta transversal entre losa y losa se lleva a efecto de las siguientes maneras:

- Junta con dispositivos de transferencia de carga (pasadores de varilla lisa de acero) con o sin malla de refuerzo por temperatura.
- Losa vaciada monolíticamente con refuerzo continuo, (acero de refuerzo de varilla corrugada armada en ambas direcciones) no se establece virtualmente la junta transversal, tomándose en cuenta para el cálculo del acero estructural la remota aparición de grietas transversales.
- Junta transversal provocada por aserrado cuya transferencia de carga se lleva a efecto a través de la trabazón entre los agregados.

En la ilustración se observa que una transferencia de cargas es nula, cuando la losa no cargada no experimenta ninguna deflexión, todo lo contrario sucede cuando hay una transferencia de cargas perfecta donde la deflexión de la losa no cargada es igual a la de la losa cargada.

**Ilustración 16:** TRANSFERENCIA DE CARGA.



**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

La capacidad de una estructura de pavimento de concreto para transferir (distribuir) cargas a través de juntas o grietas es tomado en cuenta en el método AASHTO 93 por medio del coeficiente de transferencia de carga  $J$ . Los dispositivos de transferencia de carga, trabazón de agregados y la presencia de bermas de concreto tienen efecto sobre éste valor.

La siguiente tabla establece rangos de los coeficientes de transferencia de carga para diferentes condiciones desarrolladas a partir de la experiencia y del análisis mecánico de esfuerzos. Como se puede apreciar en esta tabla el valor de  $J$  se incrementa a medida que aumentan las cargas de tráfico, esto se debe a que la transferencia de carga disminuye con las repeticiones de carga.

**Tabla 12:** COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CARGA (J).

Soporte lateral	Si	No	Si	No	Si	No	Tipo
ESALs en millones	Con pasadores con o sin refuerzo de temperatura		Con refuerzo continuo		Sin pasadores (fricción entre agregados)		
Hasta 0.3	2.7	3.2	2.8	3.2	-	-	Calles y caminos vecinales
0.3 – 1	2.7	3.2	3.0	3.4	-	-	
1 – 3	2.7	3.2	3.1	3.6	-	-	
3 – 10	2.7	3.2	3.2	3.8	2.5	2.9	Caminos principales y autopistas
10 – 30	2.7	3.2	3.4	4.1	2.6	3.0	
más de 30	2.7	3.2	3.6	4.3	2.6	3.1	

**Fuente:** Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

El uso de bermas de concreto unidas o losas ensanchadas reducen las tensiones y deformaciones en una losa. Es por eso que se usan valores menores de J. La razón para tomar J menores en pavimentos con bermas de concreto unida es porque se supone que los vehículos no transitarán por la misma. Es necesario tener en cuenta que la zona crítica de la losa es la esquina y con esta premisa las cargas se alejan de ella, permitiendo una reducción de espesores.

### 3.2.PCA-CÁLCULO.

#### 3.2.1. INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA.

El programa PCA-calculo en su versión 1.0, fue elaborado para el diseño de pavimentos de concreto para carreteras y calles, utilizando la metodología PCA-84 (Portland Cement Association – 1984). Con los conocimientos previos del método PCA podemos continuar con el estudio de la interfaz de usuario del programa, los datos de entrada y la interpretación de los resultados de salida. Este software fue desarrollado y presentado en su manual de usuario por Castro M.J. y Oribio A. (2014)<sup>10</sup> y se lo presenta a continuación:

#### 3.2.2. DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ DEL PROGRAMA

La interfaz del programa cuenta con cinco módulos principales:

### Ilustración 17: DISEÑO DE INTERFAZ DEL SOFTWARE PCA-CÁLCULO.

Archivo Ayuda

**Datos generales**

Proyecto:

Descripción:

Periodo de diseño :  años

Espesor de la losa :  in

Módulo de rotura :  psi

Dovelas:  Sí  No

Bermas :  Sí  No

**Módulo de reacción de la subrasante (K)**

Subrasante

Ingreso directo K =  pci

Correlación con CBR CBR =

Subbase

Espesor :  in

Sin tratar  Tratada con cemento

**Tránsito**

Factor de seguridad : 1.0

Tipo de Ejes : Ejes Simples

**Ejes Simples Kips**

Carga	Repeticiones
30	6310
28	14690
27	30140
24	64410
22	106900
20	235800
18	307200
16	422500
14	586900
12	1837000
0	0
0	0
0	0

**Barras de anclaje**

Diámetro de barra: 3/8" in

Acero (fy): 4000 kg/cm<sup>2</sup>

Ancho de carril: 3.05 m

**Análisis**

Espesor de losa : in

Módulo de rotura : Psi

Módulo de reacción (K) : Pci

Periodo de diseño : años

Porcentaje de fatiga

Porcentaje de erosión

Recomendación para barras de anclaje:

Longitud: in

Separación entre barras: in

Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):

Longitud: in

Separación entre barras: in

Diámetro de barras: in

Sistema de unidades :  SI  Ingles

**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

- **Primer módulo - Datos generales:** Contiene las casillas para ingresar los datos generales del proyecto, el espesor de losa, la resistencia a flexión del concreto y las características del suelo.
- **Segundo modulo – Tránsito:** Permite el ingreso de las características del tránsito, las cargas por eje, las repeticiones y el factor de seguridad.
- **Tercer módulo – Análisis:** Muestra los resultados de la iteración realizada a partir de los datos ingresados en los anteriores módulos.
- **Cuarto modulo – Barras de anclaje:** Permite escoger los datos generales de las barras de anclaje.

- **Quinto modulo – Sistema de Unidades:** Permite escoger de unidades entre el sistema internacional (SI) y el sistema inglés.

### 3.2.3. DATOS GENERALES DEL PROGRAMA

Para diseñar el pavimento se prueba un espesor de losa determinado y se verifican el consumo de fatiga y el consumo de erosión calculados. Se deben conocer las siguientes características:

- **Espesor de losa:** Permite definir el espesor de losa, el rango varía entre 100 y 350mm (4 y 14pulgadas).
- **Módulo de rotura del concreto:** Se introduce el valor requerido del módulo de rotura del concreto.
- **Unión con dovelas:** Se escoge el tipo de unión de las losas de concreto (trabazón de agregados o pasadores).
- **Bermas:** Se selecciona la opción que el pavimento tendrá, con bermas o sin bermas.
- **Módulo de reacción:** Se introduce el valor del módulo de reacción K de la subrasante o el valor del CBR respectivo. Cuando se utiliza subbase el programa considera el aporte de está calculando el K del conjunto subrasante – subbase.
- **Factor de seguridad (FS):** El método de diseño recomienda que las cargas reales esperadas se multipliquen por unos factores de seguridad, para lo cual se recomiendan los siguientes:
  - a) Para vías de carriles múltiples en las que se espere un flujo continuo de tránsito con altos volúmenes de vehículos pesados, FS=1.2
  - b) Para carreteras y vías arterias urbanas en las que se espere un volumen moderado de tránsito de vehículos pesados, FS=1.1
  - c) Para calles residenciales y otras vías en las que se espere un volumen bajo de vehículos pesados, FS=1.0
  - d) En casos especiales para mantener un nivel de serviciabilidad mayor al normal esperado durante el periodo de diseño se puede usar FS=1.3

- **Tránsito:** Los principales factores que inciden en el diseño de pavimentos rígidos son el número y la magnitud de las cargas por eje que se esperan durante el periodo de diseño.
  - a) Se selecciona el tipo de eje (simple, tándem, trídem)
  - b) Para cada tipo de eje se ingresa los diferentes pesos de los ejes por tipo
  - c) Para cada tipo de eje se ingresa el número de repeticiones esperadas.
- **Barras de anclaje:** Seleccione el diámetro de la barra, la resistencia a la fluencia del acero ( $f_y$ ) y el ancho del carril de la vía.

#### 3.2.4. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

En el módulo 3 (Análisis) encontraremos el panel en el cual vamos a realizar el análisis de la estructura de pavimento. Oprimiendo el botón calcular se realizan los cálculos y se muestra el resumen de los resultados, las propiedades del pavimento y los porcentajes de fatiga y erosión. Igualmente se presentan las recomendaciones de longitud y separación para las barras de anclaje y los pasadores. También se reporta el valor del módulo de reacción ( $K$ ) del conjunto subrasante – subbas. Los resultados se muestran en el sistema de unidades seleccionado.

### Ilustración 18: RESULTADOS DE ANÁLISIS.

Calcular			Calcular		
Espesor de losa :	9.5	in	Espesor de losa :	240	mm
Módulo de rotura :	650	Psi	Módulo de rotura :	4.5	KPa
Módulo de reacción (K)	128	Pci	Módulo de reacción (K)	35	MPa/m
Periodo de diseño :	20	años	Periodo de diseño :	20	años
<b>Porcentaje de fatiga</b>	66.38		<b>Porcentaje de fatiga</b>	73.24	
<b>Porcentaje de erosión</b>	39.50		<b>Porcentaje de erosión</b>	41.46	
<b>Recomendación para barras de anclaje:</b>			<b>Recomendación para barras de anclaje:</b>		
Longitud:	33	in	Longitud:	85	cm
Separación entre barras:	47	in	Separación entre barras:	120	cm
<b>Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):</b>			<b>Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):</b>		
Longitud:	18	in	Longitud:	45	cm
Separación entre barras:	12	in	Separación entre barras:	30	cm
Diámetro de barras:	1.25	in	Diámetro de barras:	3.18	cm

**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

#### 3.2.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL PROGRAMA

El programa cuenta con la opción de realizar un análisis de sensibilidad de la estructura del pavimento rígido, para lo cual se oprime el botón análisis de sensibilidad del módulo 3 (Análisis).

**Ilustración 19: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.**

**Recomendación para pasadores  
( $f_y=60$  ksi):**

Longitud:	45	cm
Separación entre barras:	30	cm
Diámetro de barras:	3.18	cm

Análisis de sensibilidad

Guardar      Abrir

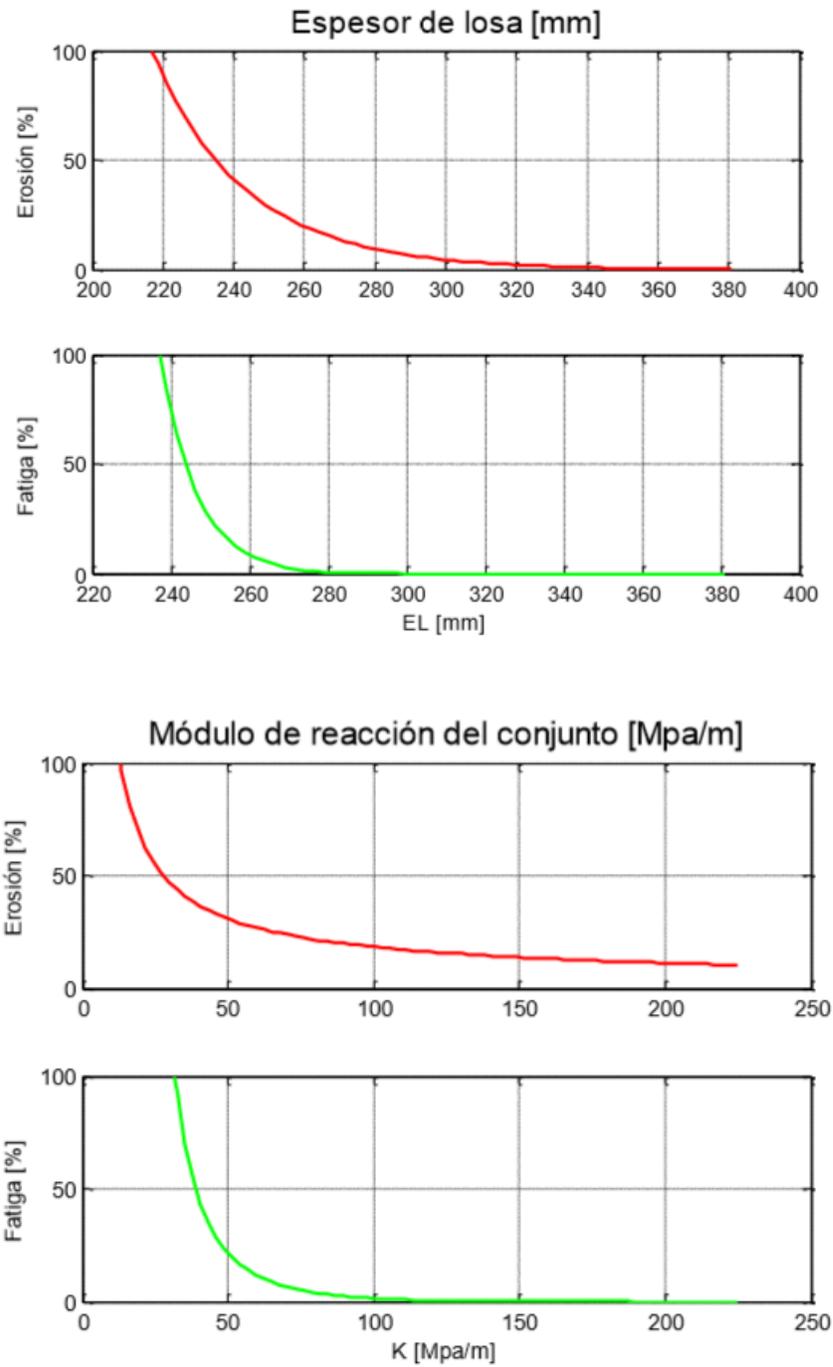
TXT      Salir

**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

De esta forma podemos ver cómo se comporta el pavimento si variamos el módulo de reacción del suelo, el módulo de rotura del concreto y el espesor de la losa, como se muestra a continuación:

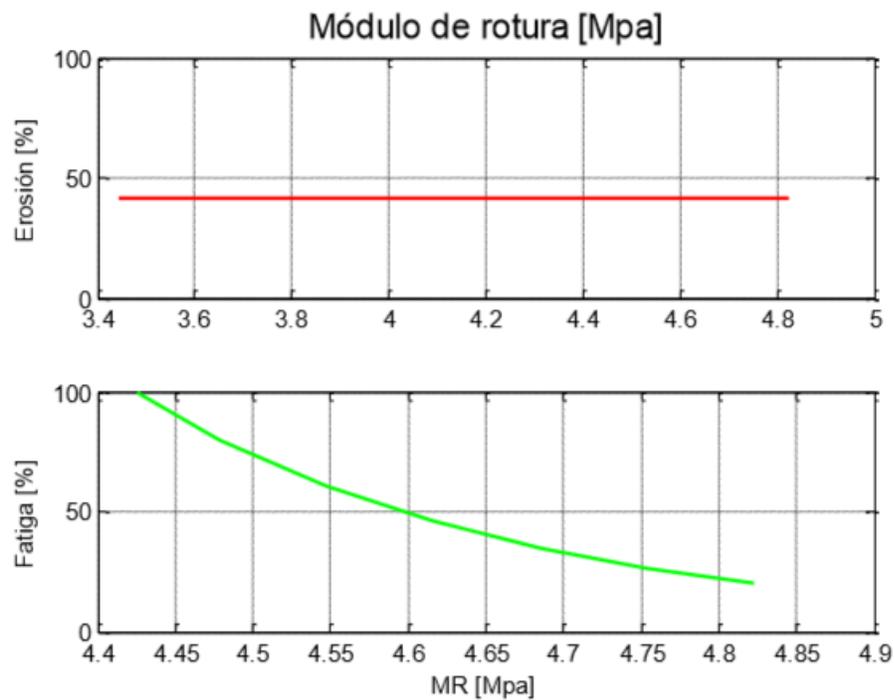
**Ilustración 20:** RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

Gráficos resultados del análisis de sensibilidad



**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

Ilustración 20 continuación.



**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

### 3.2.6. INGRESO DE DATOS DE UN PROYECTO NUEVO

#### ➤ SISTEMA DE UNIDADES

El programa permite utilizar dos sistemas de unidades, el sistema internacional (SI) o el sistema inglés. El sistema de unidades por defecto es el sistema inglés. Para cambiar el sistema de unidades selecciones la opción de su interés en la parte inferior del módulo 5.

**Ilustración 21:** SISTEMAS DE UNIDADES.

Sistema de unidades :  SI  Ingles

Sistema Ingles	Sistema internacional	coeficiente de conversión
in	mm	25.4
ft	mm	0.305
lb	Kg	0.454
lbf	N	4.45
kip	KN	4.45
lb/in <sup>2</sup>	Mpa	0.00689
lb/in <sup>3</sup> (K)	Mpa/m	0.271

**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

➤ **DATOS GENERALES DEL PROYECTO**

En estos campos se ingresa el nombre del proyecto y una breve descripción del mismo.

**Ilustración 22:** DATOS GENERALES.

Datos generales

Proyecto:

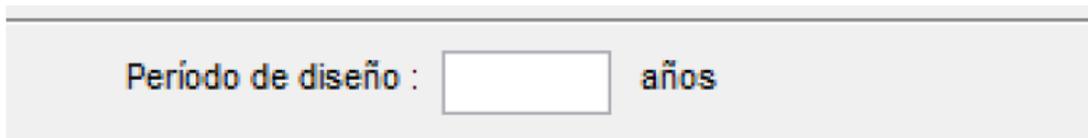
Descripción:

**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

### ➤ PERIODO DE DISEÑO

El periodo de diseño corresponde al periodo de análisis de tránsito. El valor ingresado no afecta los cálculos dado que el programa trabaja con las repeticiones de carga ingresada en el módulo 2 (Transito). Al ingresar este dato el periodo de diseño será incluido en el reporte del programa.

#### **Ilustración 23:** PERIODO DE DISEÑO, PCA-CÁLCULO.



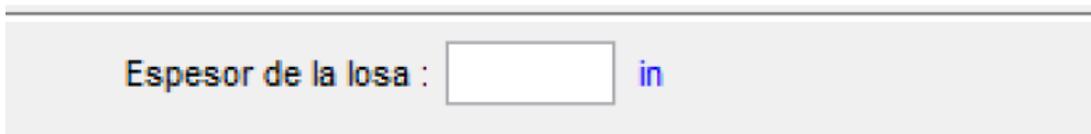
Periodo de diseño :  años

**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

### ➤ ESPESOR DE LA LOSA

En este campo ingrese el espesor de losa que desee evaluar. El rango de espesor varía normalmente entre 100 y 350 mm en el sistema internacional o 4 y 14 pulgadas en el sistema inglés.

#### **Ilustración 24:** ESPESOR DE LA LOSA, PCA-CÁLCULO.



Espesor de la losa :  in

**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

### ➤ MÓDULO DE ROTURA

Ingrese la resistencia a flexión del concreto a los 28 días. Por lo general se toman valores entre 3.8 y 4.5 MPa (550 y 650 psi).

**Ilustración 25: MÓDULO DE ROTURA, PCA-CÁLCULO.**

Módulo de rotura : <input type="text"/> psi
---

**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

➤ **DOVELAS Y BERMAS**

En estos campos se escoge el tipo de transmisión de carga, con o sin dovelas, y la presencia o no de bermas.

**Ilustración 26: DOVELAS Y BERMAS, PCA-CÁLCULO.**

Dodelas:	<input checked="" type="radio"/> Si	<input type="radio"/> No
Bermas :	<input type="radio"/> Si	<input checked="" type="radio"/> No

**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

➤ **MÓDULO DE REACCIÓN DEL CONJUNTO SUBRASANTE – SUBBASE**

Se puede ingresar el valor del módulo de reacción K de la subrasante, para lo cual se escoge la primera opción. La otra alternativa es ingresar la capacidad de soporte (CBR) de la subrasante y el programa estima el valor de K con base en las recomendaciones de la PCA.

Si se desea ingresar el espesor de la subbase debe activarse la opción seleccionando Subbase, e ingresando el espesor de la capa de subbase.

Además se puede escoger entre material tratado con cemento o no.

**Ilustración 27:** MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE, PCA-CÁLCULO.

**Módulo de reacción de la subrasante (K)**

*Subrasante*

Ingreso directo      K =  pci

Correlación con CBR      CBR =

---

Subbase

Espesor :  in

Sin tratar       Tratada con cemento

**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

➤ **FACTOR DE SEGURIDAD**

En la parte superior del módulo 2 (Transito), se encuentra el menú desplegable donde se puede seleccionar el valor del FS.

**Ilustración 28:** FACTOR DE SEGURIDAD, PCA-CÁLCULO.

Factor de seguridad : 1.0 ▼

Tipo de Ejes : 1.1 es ▼

Ejes Simples kips

**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

### ➤ TRÁNSITO, CARGAS Y REPETICIONES

El programa posee la capacidad para realizar análisis para los ejes simples, tándem y tridem, los cuales se encuentran en el menú desplegable que se muestra en la figura. Al escoger el tipo de eje se activa la tabla de cargas y repeticiones para el tipo de eje escogido.

Las cargas se encuentran en unidades de kips para el sistema inglés y KN en el sistema internacional. El programa despliega por defecto valores normalizados de carga, los cuales pueden ser modificados.

**Ilustración 29:** TABLAS DE CARGAS Y REPETICIONES, PCA-CÁLCULO.

The image shows two screenshots of the PCA-CÁLCULO software interface. The left screenshot shows the 'Tipo de Ejes' dropdown menu with 'Ejes Simples' selected. The right screenshot shows the 'Ejes Simples Kips' table.

Carga	Repeticiones
30	6310
28	14690
26	30140
24	64410
22	106900
20	235800
18	307200
16	422500
14	586900
12	1837000
0	0
0	0
0	0

Carga	Repeticiones
30	6310
28	14690
26	30140
24	64410
22	106900
20	235800
18	307200
16	422500
14	586900
12	1837000
0	0
0	0
0	0
0	0

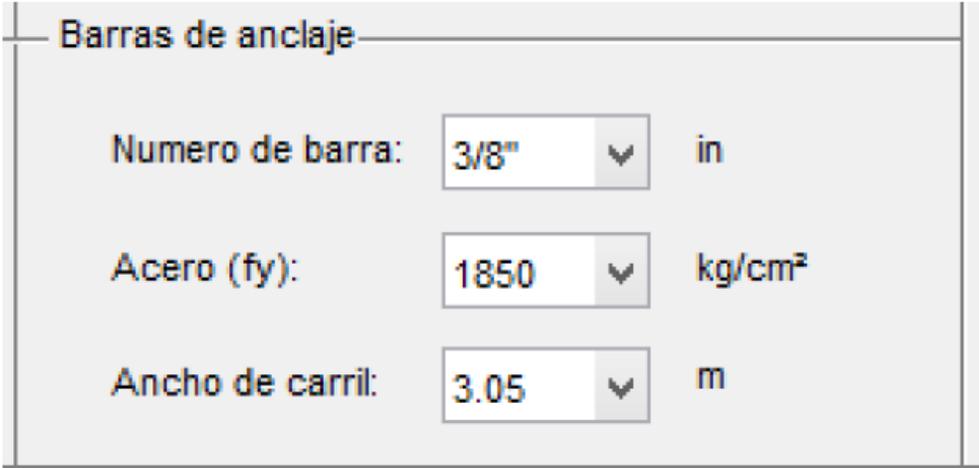
**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

### ➤ BARRAS DE ANCLAJE

Para calcular la longitud y la separación de las barras de anclaje ingrese las propiedades de la barra, su diámetro y la resistencia a la fluencia ( $f_y$ ). También es necesario indicar

el ancho del carril, que afecta directamente la separación entre barras. Estas características se escogen en los menús desplegables que se encuentran en el módulo 4 (Barras de anclaje).

**Ilustración 30:** TABLAS DE CARGAS Y REPETICIONES, PCA-CÁLCULO.



Barras de anclaje		
Numero de barra:	3/8" ▼	in
Acero (fy):	1850 ▼	kg/cm <sup>2</sup>
Ancho de carril:	3.05 ▼	m

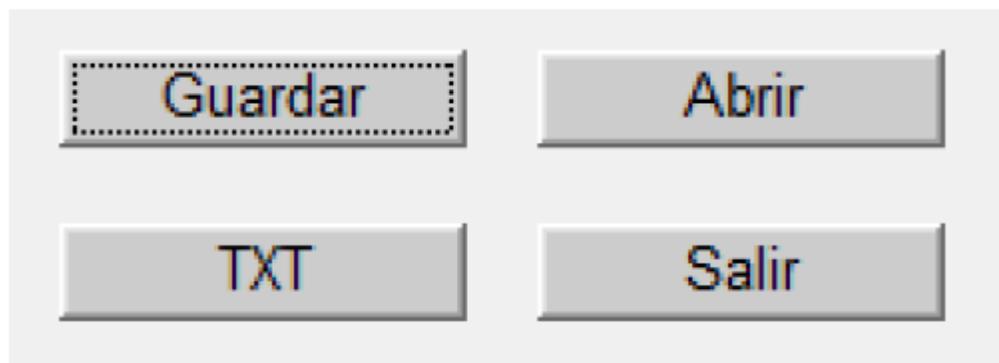
**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

#### ➤ GUARDAR

Para guardar los datos del proyecto se tienen dos opciones:

Guardar desde el módulo 3 (Análisis), oprimiendo en el botón guardar de este panel.

**Ilustración 31:** TABLAS DE CARGAS Y REPETICIONES, PCA-CÁLCULO.



**Fuente:** PCA-cálculo diseño de pavimentos rígidos manual de usuario.

**CAPÍTULO IV**  
**APLICACIÓN PRÁCTICA**

## **CAPITULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA.**

### **4.1. UBICACIÓN DEL ESTUDIO.**

El estudio del proyecto se realiza en tres tramos de la ciudad de Tarija que cuentan con los requisitos necesarios para ejecutarlo, es por esto que la aplicación práctica del estudio requiere de datos específicos de estos tres tramos.

Los tramos en los que se realiza el estudio son:

- Avenida Circunvalación entre avenida Froilán Tejerina hasta la ruta salida norte.
- Avenida Jaime Paz Zamora entre calle España y avenida Padilla.
- Ingreso a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.

### **4.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO.**

Los tramos de estudio están ubicados en la ciudad de Tarija que cuenta con las siguientes características:

#### **➤ POBLACIÓN.**

Tarija ciudad originalmente fundada con el nombre de Villa de San Bernardo de la Frontera de Tarixa, es un municipio y una ciudad de Bolivia, capital del departamento homónimo. Cuenta con una población de 179.528 habitantes, por lo que es la ciudad más poblada de la Provincia de Cercado y la séptima de Bolivia. Se encuentra ubicada en el valle del río Nuevo Guadalquivir a 1874 msnm. La provincia de Cercado tiene 205.818 habitantes en total, según el censo de 2012.

#### **➤ GEOGRAFÍA.**

Se encuentra situada en el valle central del departamento de Tarija y limita al norte y oeste con la provincia Méndez, al este con la Provincia de Burdet O'Connor y al sur con las provincias de Avilés y Aniceto Arce. Su clima es templado, con una temperatura promedio de 18°C. Tarija tiene acceso vial hacia la frontera con la Argentina y con las ciudades de Sucre y Potosí y cuenta con el Aeropuerto Internacional Cap. Oriel Lea Plaza. Sus recursos hídricos están distribuidos en dos

cuencas: la del río Santa Ana y la de los ríos Tolomosa y Sella, siendo este último afluente del río Guadalquivir.

➤ **CLIMA.**

El clima de la ciudad de Tarija y el valle en la que se encuentra es llamado "paraíso de la primavera", ya que predomina durante la mayor parte del año un clima templado o mesotérmico, sin embargo durante los inviernos (especialmente durante el mes de julio) la temperatura suele bajar de los 0° C llegando a disminuciones térmicas increíbles para la latitud y altitud (la zona es en los mapas "tropical"): todos los inviernos son fríos; por ejemplo en 1966 se registró en esta ciudad una temperatura absoluta de -9,5 °C (nueve grados y medio bajo cero) y el 20 de julio de 2010 en la misma ciudad de San Bernardo de Tarija la temperatura bajó a - 9, 2 °C (nueve grados con dos décimas bajo cero) acompañada tal temperatura por copiosas nevadas.

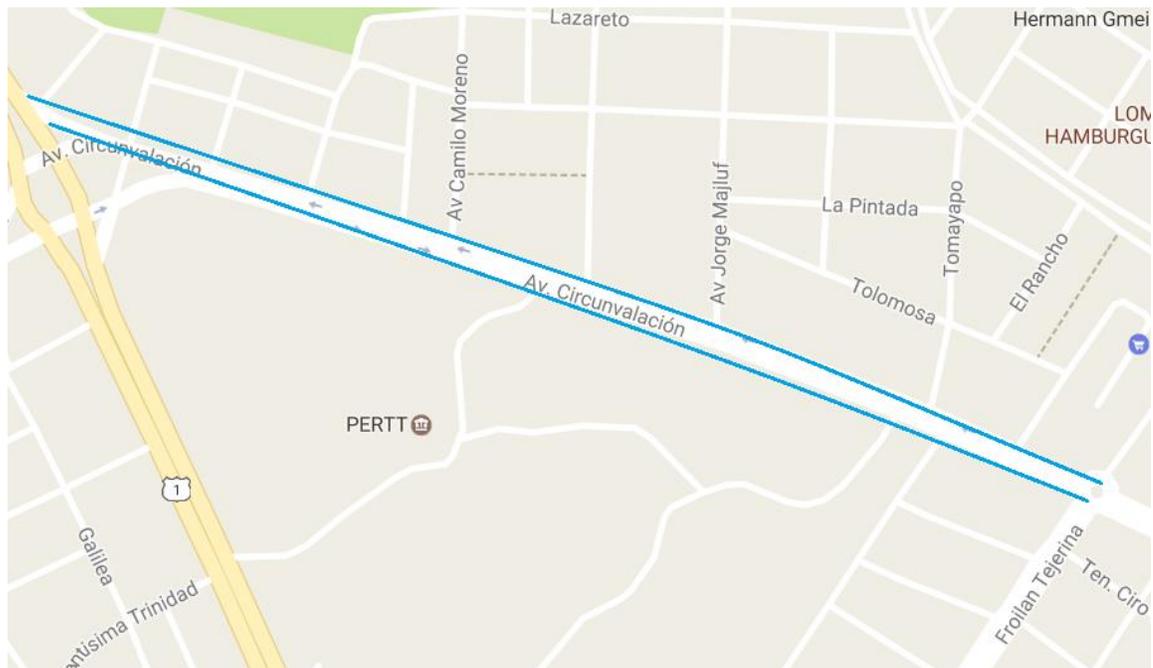
➤ **HIDROGRAFÍA.**

En el departamento de Tarija comprenden dos sistemas hidrográficos. El primer sistema está formado principalmente por los ríos Pilcomayo que entre los más importantes podemos mencionar el río Pilaya, San Juan de Oro, Tomayapo etc. El segundo sistema está formado por las siguientes unidades hidrográficas, la cuenca del río Bermejo, la cuenca del río grande de Tarija, la cuenca del río Carapari.

#### **4.2.1. AVENIDA CIRCUNVALACIÓN.**

El tramo de estudio de la avenida Circunvalación está ubicado entre la avenida Froilán Tejerina hasta llegar a la ruta de la carretera norte que divide los barrios Defensores del Chaco con el barrio María de los Ángeles. Es un tramo bastante concurrido por el cual transita transporte pesado, transporte público y vehículos particulares, todos estos con bastante frecuencia.

**Ilustración 32: TRAMO AVENIDA CIRCUNVALACIÓN.**

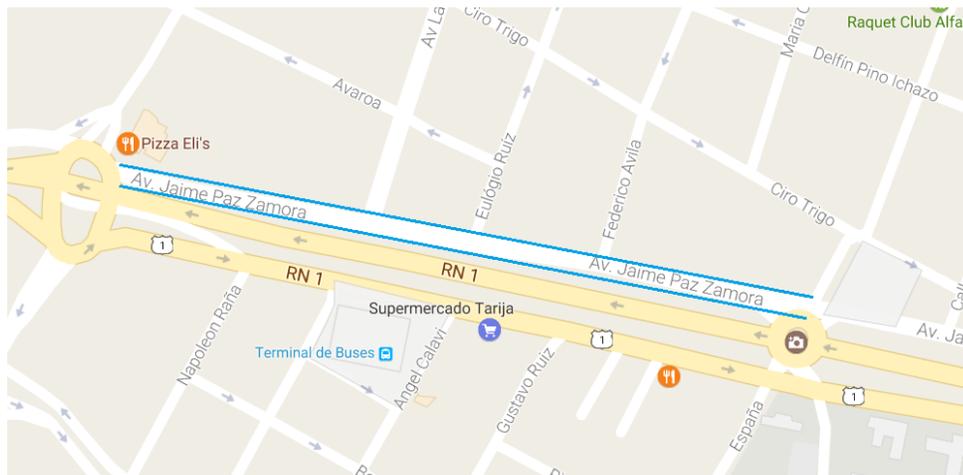


**Fuente:** Googlemaps.

#### **4.2.2. AVENIDA JAIME PAZ ZAMORA**

El tramo de estudio de la avenida Jaime Paz Zamora está ubicada entre la avenida Padilla y la calle España en el barrio la Terminal. Este tramo es exclusivo para vehículos particulares y transporte público en el cual no transitan vehículos de alto tonelaje, como camiones de más de 10 toneladas ni buses con capacidad de 35 pasajeros.

**Ilustración 33: TRAMO AVENIDA JAIME PAZ ZAMORA.**

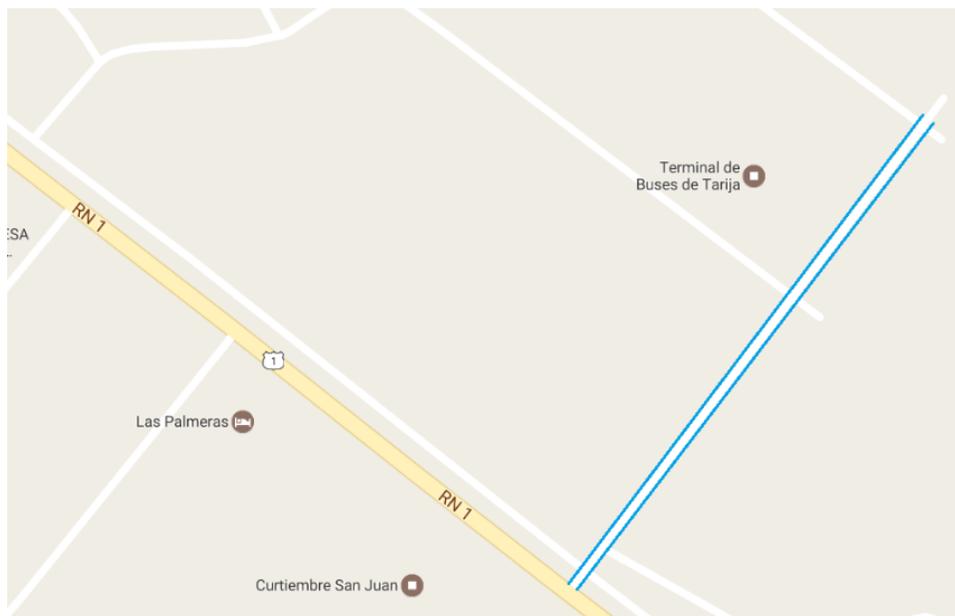


**Fuente:** Googlemaps.

#### 4.2.3. INGRESO A LA TERMINAL NUEVA DE LA CIUDAD DE TARIJA

Este tramo es una entrada al barrio Torrecillas ya que el proyecto es nuevo y las calles adyacentes no están pavimentadas este tramo es pequeño y se realiza solo hasta la terminal.

**Ilustración 34: TRAMO INGRESO A LA NUEVA TERMINAL.**



**Fuente:** Googlemaps.

### **4.3. PARÁMETROS DE DISEÑO.**

Los parámetros de diseño para el cálculo de los espesores de losa fueron solicitados en la alcaldía del departamento de Tarija, frente a la respuesta emitida por los funcionarios de la misma entidad (Anexo 38) se enfrentó el proyecto con datos obtenidos en la actualidad, con ensayos y estudios realizados continuación.

#### **4.3.1. VARIABLE TIEMPO.**

La variable tiempo es un parámetro de diseño muy importante, que en nuestro caso tomaremos como estudio tres tiempos diferentes en cada tramo para obtener más resultados y poder compararlos entre el software y los métodos manuales consiguiendo un mejor análisis de un método a otro que es el objetivo de esta investigación.

Ya que el tiempo afecta todos los parámetros de diseño se considera el siguiente análisis:

- El método AASHTO nos indica según su confiabilidad que el pavimento se comporta satisfactoriamente durante su vida útil o periodo de diseño, resistiendo las condiciones de tráfico y medio ambiente dentro de dicho periodo. Es fácil deducir que si el número ESAL's previsto es menor que el número real, la vida útil del pavimento se acortara. Por lo tanto la variabilidad en el diseño, en la construcción afectan en gran medida la bondad de un diseño. Por ejemplo: La variación en las propiedades de los materiales a lo largo del tiempo produce como resultado una variación en el desarrollo de fallas y rugosidad en ese pavimento; La variación entre los datos de diseño del pavimento y los reales pueden significar un aumento o disminución de la vida útil del mismo.

Es por esto que el método AASHTO adopta la variable de desviación estándar ( $S_o$ ) que acota la variabilidad de estos parámetros dentro de unos límites permisibles, con el fin de asegurar que la estructura del pavimento se comporte adecuadamente durante su periodo de diseño. Ejemplo\*:

---

\* AASHTO (1993). Pp. 16

Donde  $Z_R$  es el área bajo la curva de distribución, correspondiente a la curva estandarizada, para  $R = 90 \%$ ,  $Z_R = 1.28$ .

$$\text{Sea } N_T = 1 \times 10^6 \quad R = 90 \% \quad Z_R = 1.28$$

$$\text{Log (ESALs}_{\text{diseño}}) = \log 1 \times 10^6 + 1.28 * 0.49 = 6.6272 \longrightarrow \text{ESALs}_{\text{diseño}} = 4.238 \times 10^6$$

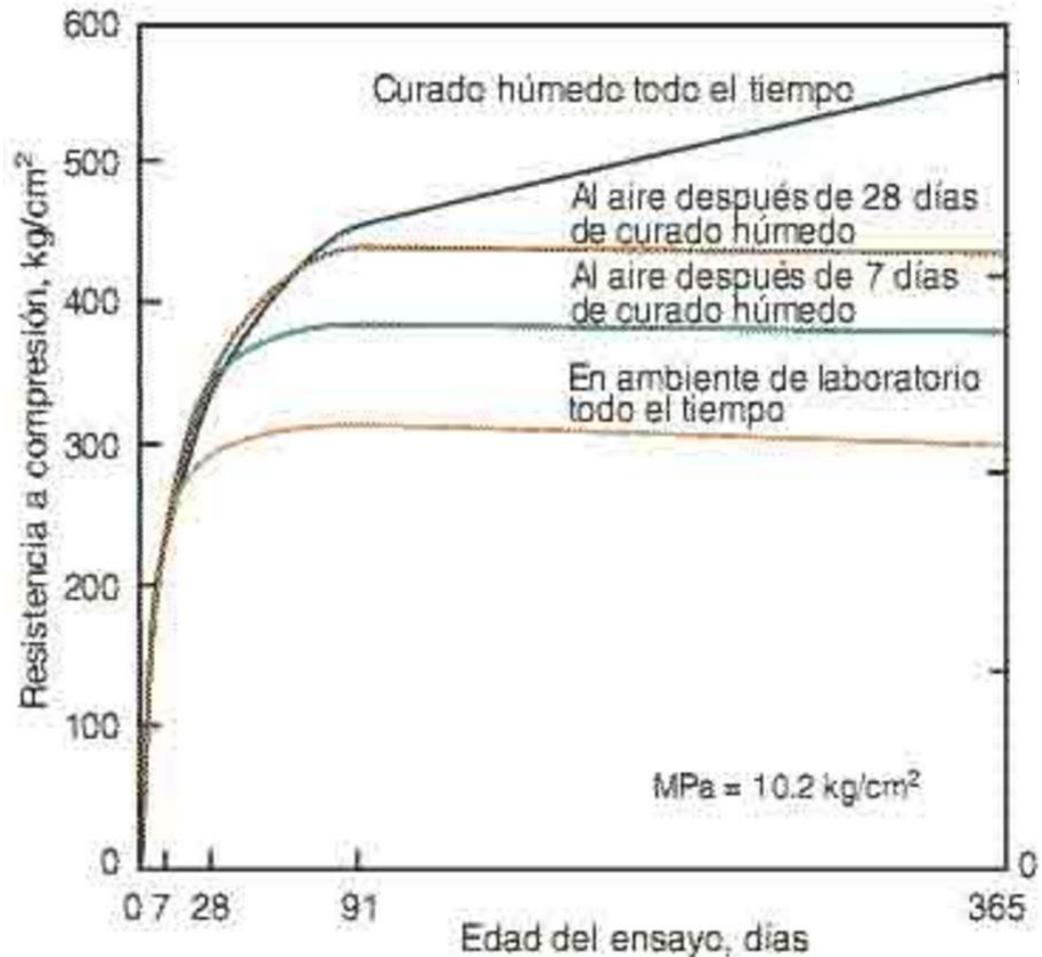
Esto significa que el pavimento va a diseñarse para  $4.238 \times 10^6$  ESALs en lugar de los  $1 \times 10^6$ . La diferencia entre estos valores es un coeficiente de seguridad cuyo propósito es tener en cuenta la incertidumbre y variabilidad en el diseño, la construcción y distribución de cargas.

- El método PCA tiene la misma perspectiva de diseño para esto adopta el factor de seguridad que mayor la carga de diseño para prevenir algún inconveniente constructivo, deterioro de materiales, etc.

Dicho esto las variables que no podemos despreciar en función del tiempo son el número ESAL's y la resistencia a la compresión del concreto que es necesario para calcular el módulo de rotura del hormigón y el módulo de elasticidad.

- El número ESAL's se calcula para cada tramo y para cada periodo de diseño en específico.
- La resistencia a la compresión es una variable muy importante que es necesario para obtener el módulo de rotura y el módulo de elasticidad como dato de entrada para el diseño de pavimentos rígidos, ya que va a controlar el agrietamiento por fatiga del pavimento, originado por las cargas repetitivas de camiones. El pavimento de concreto hidráulico alcanza un esfuerzo para el diseño del 100% de su diseño a los 28 días siendo este esfuerzo el utilizado para el diseño lo que no pasa en la realidad, el concreto con el pasar del tiempo va alcanzando más resistencia a la compresión como se ve en la siguiente ilustración.

**Ilustración 35:** RESISTENCIA DEL CONCRETO VS EL TIEMPO.



**Fuente:** Blog del ingeniero civil.

Se puede ver en la ilustración que la resistencia del concreto varía según su curado y el tiempo, la resistencia del hormigón que necesitamos como dato es la resistencia de compresión a los 28 días no obstante el concreto que utilizamos como muestra en nuestros datos no tendrá variación en su resistencia, puede tener deterioro por otros factores estructurales y de construcción pero el hormigón como tal no reducirá su resistencia a la compresión hasta alcanzar su vida útil, por esta razón utilizamos la resistencia del hormigón obtenida de los núcleos extraídos en campo. Para contar con muestras más confiables se extrajeron de diferentes puntos de cada tramo y se obtuvieron resultados similares lo que demuestra el buen estado de la muestra.

Con el debido análisis del comportamiento de los materiales y el procesamiento de los métodos al momento de estudiarlos se llega a la decisión de variar solo el número ESAL's en función del tiempo ya que los periodos de análisis que tomaremos no sobrepasan la vida útil del pavimento, solo mostrarán un espesor requerido según el tráfico y las condiciones del pavimento en la actualidad.

El cálculo se realizará en tres periodos de análisis:

- El primero es el tiempo en el que el paquete estructural fue diseñado con un periodo de diseño igual a su vida útil que es específica para cada tramo. Nos da como resultado un espesor de losa con el que debería haber sido construido el tramo.
- El segundo es el tiempo en el que realizamos el estudio actual es decir con un periodo de diseño que es la diferencia de la vida útil con el tiempo transcurrido desde su ejecución. Este periodo de análisis nos da como resultado el espesor de losa que es necesario para concluir su vida útil.
- El tercero es el tiempo en el que el periodo de diseño es el tiempo transcurrido desde su ejecución hasta la actualidad. El resultado de espesor de losa es el requerido para que el pavimento llegue a la actualidad con una serviciabilidad final.

**a) Avenida Circunvalación.**

- Según información brindada por la alcaldía el periodo de análisis del tramo avenida circunvalación entre Froilán Tejerina y la ruta salida norte fue considerada entre 35 y 45 años debido a la falta de información asumiremos un periodo de análisis de 35 años para este tramo. Es una zona urbana con alto volumen de tráfico liviano y pesado, la recomendación del manual AASHTO 1993 nos recomienda usar un periodo de análisis de 30 a 50 años esto quiere decir que estamos dentro de lo recomendado.
- Para el segundo tiempo tiene un periodo de análisis de  $1998+35=2033-2016=17$  años.
- Para el tercer tiempo tiene un periodo de análisis de  $2016-1998=18$  años.

**b) Avenida Jaime Paz Zamora.**

- Según información brindada por la alcaldía el periodo de análisis del tramo avenida Jaime Paz Zamora fue considerada entre 35 y 45 años debido a la falta de información asumiremos un periodo de análisis de 35 años para este tramo. Este tramo fue diseñado el año 1990, en ese entonces este tramo fue una ruta con altos volúmenes de tráfico pesado y liviano lo que en la actualidad está restringido para vehículos livianos y transporte público de no más de 35 pasajeros ni camiones de más de 10 toneladas.

Es una zona urbana con alto volumen de tráfico liviano y pesado, la recomendación del manual AASHTO 1993 nos recomienda usar un periodo de análisis de 30 a 50 años esto quiere decir que está dentro de lo recomendado.

- Para el segundo tiempo tiene un periodo de análisis de  $1990+35=2025-2016=9$  años.
- Para el tercer tiempo tiene un periodo de análisis de  $2016-1990=26$  años.

**c) Ingreso a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.**

- Según información brindada por la alcaldía el periodo de análisis del tramo ingreso a la terminal nueva de la ciudad de Tarija fue considerada de 30 años. Es una zona urbana con alto volumen de tráfico liviano y pesado, la recomendación del manual AASHTO 1993 nos recomienda usar un periodo de análisis de 30 a 50 años esto quiere decir que está dentro de lo recomendado.
- Para el segundo tiempo tiene un periodo de análisis de  $2014+30=2044-2016=28$  años.
- Para el tercer tiempo tiene un periodo de análisis de  $2016-2014=2$  años.

**4.3.2. NÚMERO EQUIVALENTE DE EJES DE 80 KN (ESAL'S)**

Los pavimentos se proyectan para que éstos resistan determinado número de cargas durante su vida útil. El tránsito está compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes que producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, lo cual origina distintas fallas en éste. Para tener en cuenta esta diferencia, el tránsito se transforma a un número de cargas por eje simple equivalente de 18 kips (80 kN) ó

ESAL (Equivalent Single Axle Load), de tal manera que el efecto dañino de cualquier eje pueda ser representado por un número de cargas por eje simple.

Se realizara un ejemplo del primer tiempo en los 3 tramos:

**a) Avenida Circunvalación.**

- **Transito promedio diario.**

Realizando el aforo vehicular correspondiente para 10 días se obtuvo un promedio del número de vehículos que transitan a diferentes horarios el cual se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 13: AFORO PROMEDIO EN 10 DIAS AV. CIRCUNVALACION.**

		AV. CIRCUNVALACION									
		IZQUIERDA					DERECHA				
N°	TIPO DE VEHICULO	7:00 - 8:00	9:00 - 10:00	12:00 - 13:00	17:00 - 18:00	19:00 - 20:00	7:00 - 8:00	9:00 - 10:00	12:00 - 13:00	17:00 - 18:00	19:00 - 20:00
1	Automoviles y vagonetas	513	557	1007	1047	1058	370	509	694	708	763
2	Camionetas (2tn)	36	80	103	119	125	68	56	91	82	103
3	Minibuses (hasta 15 pasajeros)	8	17	15	16	17	16	17	14	12	16
4	Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	6	16	24	24	26	4	20	14	16	17
5	Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	4	7	3	10	11	2	5	2	6	5
6	Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	1	1	0	1	2	1	1	1	6	4
7	Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	28	40	48	50	58	28	40	52	50	56
8	Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	4	4	6	4	4	5	17	34	19	34
9	Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	8	7	5	9	12	6	8	6	9	10
10	Camiones semiremolque	1	1	1	2	4	2	2	3	1	2
11	Camiones remolque	5	4	5	4	6	1	1	2	2	4
12	Otros vehículos	131	100	210	151	176	95	44	184	111	149

**Fuente:** Elaboración propia.

El aforo vehicular se muestra en el anexo 1.

Continuamos con el cálculo del número vehicular para todas las horas mediante graficas obtenidas utilizando el carril con mayor cantidad de tráfico, que en este caso sería el carril izquierdo que tiene dirección de la avenida Froilán Tejerina hacia la ruta norte, estas gráficas se realizan para cada tipo de vehículo con el cual obtendremos un volumen de tráfico diario o TPD.

Las gráficas para el desarrollo de la siguiente tabla se muestran en el anexo 2. Las gráficas muestran el número de vehículos que transitan ese tramo en diferentes horarios, la tabla siguiente es la sumatoria de todas las horas dándonos el TPD.

**Tabla 14:** VOLUMEN DE TRÁFICO DIARIO AV. CIRCUNVALACIÓN.

<b>VOLUMEN DE TRÁFICO DIARIO</b>	
<b>TIPO DE VEHÍCULO</b>	<b>AV. CIRCUNVALACIÓN</b>
Automóviles y vagonetas	11442
Camionetas (2tn)	1273
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	200
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	269
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	91
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	14
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	599
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	63
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	103
Camiones semirremolque	23
Camiones remolque	64
Otros vehículos	2083

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Índice de crecimiento.**

El índice de crecimiento lo estimamos mediante el crecimiento vehicular entre los años del diseño, que en nuestro caso el diseño fue realizado en el año 1998.

Se cuenta con un registro del crecimiento del parque automotor según el tipo de vehículo mostrado en el anexo 3, debido a la falta de datos realizaremos una regresión con las ecuaciones ajustadas para los datos con los que contamos. Se realizará un ejemplo de un tipo de vehículo, en este caso de automóviles y vagonetas para tomar como ejemplo el procedimiento de cálculo y una mejor comprensión del mismo.

**Tabla 15:** ECUACIÓN AJUSTADA DEL CRECIMIENTO DEL PARQUE AUTOMOTOR AV. CIRCUNVALACIÓN.

ECUACIONES AJUSTADAS DEL CRECIMIENTO DEL PARQUE AUTOMOTOR	
Automóviles y vagonetas	$N^{\circ} = 2E-80e0,098 * \text{Año}$
Camionetas (2tn)	$N^{\circ} = 1E-58e0,0721 * \text{Año}$
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	$N^{\circ} = 4E-90e0,1079 * \text{Año}$
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	$N^{\circ} = 2E-19e0,0264 * \text{Año}$
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	$N^{\circ} = 2E-19e0,0264 * \text{Año}$
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	$N^{\circ} = 2E-39e0,0487 * \text{Año}$
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	$N^{\circ} = 7E-52e0,0643 * \text{Año}$
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	$N^{\circ} = 7E-52e0,0643 * \text{Año}$
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	$N^{\circ} = 7E-52e0,0643 * \text{Año}$
Camiones semirremolque	$N^{\circ} = 2E-252e0,293 * \text{Año}$
Camiones remolque	$N^{\circ} = 7E-186e0,2143 * \text{Año}$
Otros vehículos	$N^{\circ} = 1E-207e0,2428 * \text{Año}$

**Fuente:** Elaboración propia.

Con estas ecuaciones se realizó una serie de relleno para cada tipo de vehículo y para cada año requerido donde se obtuvo un índice de crecimiento para cada vehículo.

Ejemplo Automóviles y vagonetas:

$$N^{\circ} = 2 \times 10^{-80} * e^{0,98 * 1998}$$

$$N^{\circ} = 217584$$

**Tabla 16:** VOLUMEN DE TRÁFICO PARA 1998-1999 AV.  
CIRCUNVALACIÓN.

TIPO DE VEHICULO	1998	1999
Automóviles y vagonetas	217584	239987
Camionetas (2tn)	36529	39260
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	16947	18878
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	16175	16608
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	16175	16608
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	3623	3803
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	43603	46499
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	43603	46499
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	43603	46499
Camiones semirremolque	349	468
Camiones remolque	6	8
Otros vehículos	4814	6137

**Fuente:** Elaboración propia.

Ejemplo Automóviles y vagonetas:

$$i = 100 * \frac{239987 - 217584}{239987}$$

$$i = 9,34$$

**Tabla 17:** ÍNDICE DE CRECIMIENTO AV. CIRCUNVALACIÓN.

TIPO DE VEHÍCULO	ÍNDICE DE CRECIMIENTO
Automóviles y vagonetas	9,34
Camionetas (2tn)	6,96
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	10,23
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	2,61
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	2,61
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	4,73
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	6,23
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	6,23
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	6,23
Camiones semirremolque	25,43
Camiones remolque	25,00
Otros vehículos	21,56

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Factor de crecimiento.**

Utilizando la ecuación 9 realizamos el cálculo del Factor de crecimiento con un periodo de diseño de 35 años y los índices de crecimiento de la tabla anterior.

Ejemplo Automóviles y vagonetas:

$$FC = \frac{\left(1 + \frac{9,34}{100}\right)^{35} - 1}{\frac{9,34}{100}}$$

$$FC = 232,77$$

**Tabla 18:** FACTOR DE CRECIMIENTO AV. CIRCUNVALACIÓN.

TIPO DE VEHÍCULO	FACTOR DE CRECIMIENTO
Automóviles y vagonetas	232,77
Camionetas (2tn)	136,92
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	285,69
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	56,06
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	56,06
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	85,48
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	117,00
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	117,00
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	117,00
Camiones semirremolque	10921,22

Camiones remolque	271,02
Otros vehículos	4298,56

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Tránsito de diseño.**

El tránsito de diseño lo calculamos con la ecuación 10. El tránsito promedio diario es medido en el año 2016, utilizando el índice de crecimiento realizamos una regresión para obtener un tránsito promedio diario estimado para el año 1998 el cual se multiplica con el factor de crecimiento por 365 que es el número de días del año para obtener el tránsito de diseño.

Ejemplo Automóviles y vagonetas:

$$TPD\ 1998 = \frac{11442}{\left(1 + \frac{9,34}{100}\right)^{18}}$$

$$TPD\ 1998 = 2295$$

$$\text{Tránsito de diseño} = 2295 * 232,77 * 365$$

$$\text{Tránsito de diseño} = 194985088,77$$

**Tabla 19:** TRÁNSITO DE DISEÑO AV. CIRCUNVALACIÓN.

TIPO DE VEHÍCULO	VOLUMEN DE TRAFICO DIARIO 1998	FACTOR DE CRECIMIENTO	TRÁNSITO DE DISEÑO
Automóviles y vagonetas	2295	232,77	194985089
Camionetas (2tn)	379	136,92	18941277,4
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	35	285,69	3649679,12

Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	169	56,06	3458145,91
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	57	56,06	1166356,91
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	6	85,48	187203,493
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	202	117,00	8626135,46
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	21	117,00	896776,459
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	35	117,00	1494627,43
Camiones semirremolque	1	10921,22	3986245,84
Camiones remolque	12	271,02	1187086,73
Otros vehículos	62	4298,56	97276306,4

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Factor equivalente de carga (LEF, por sus siglas en inglés)**

El factor equivalente de carga lo obtendremos de las tablas previstas por el manual de la AASHTO, estas tablas son específicas para cada tipo de eje (simple, tándem, tridem) y para una servisiabilidad final dada, se encuentran en el anexo 5.

Para el uso de esta tabla se debe contar con los siguientes datos:

- Numero estructural estimado en este caso utilizaremos de 9”.
- El peso de cada vehículo en KN o Kips.
- Numero de ejes para cada tipo de vehículo.
- Servisiabilidad final en este caso es igual a 2,5.

Los resultados obtenidos de las tablas son:

**Tabla 20: FACTOR EQUIVALENTE DE CARGA (LEF) AV.  
CIRCUNVALACIÓN.**

TIPO DE VEHICULO	PESO MAXIMO (tn)	PESO TOTAL (KN)	TIPO DE EJE	LEF's
Automoviles y vagonetas	1,5	14,715	SIMPLE	0,0014
Camionetas (2tn)	2	19,62	SIMPLE	0,0036
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	2,4	23,544	SIMPLE	0,0100
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	5,2	51,012	SIMPLE	0,1500
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejos)	7	68,67	SIMPLE	0,5300
Buses grandes (más de 35pjs;3ejos)	8,8	86,328	TAMDEM	0,1800
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejos)	10	98,1	SIMPLE	2,3600
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejos)	14,5	142,245	SIMPLE	10,6600
Camiones grandes (más de 10tn;3ejos)	18,5	181,485	TAMDEM	4,0600
Camiones semiremolque	20	196,2	TRIDEM	1,7600
Camiones remolque	25	245,25	TRIDEM	4,3500
Otros vehículos	1	9,81	SIMPLE	0,0004

**Fuente:** Elaboración propia.

Calculamos el eje equivalente acumulado ( $W_{18}'$ ) multiplicando el tránsito de diseño con el factor equivalente de carga y sumamos el total de cada vehículo:

Ejemplo Automóviles y vagonetas:

$$W_{18}' = 194985089 * 0,0014$$

$$W_{18}' = 272979,124.$$

**Tabla 21: N° DE ESAL'S PARA CADA TIPO DE VEHÍCULO AV.  
CIRCUNVALACIÓN.**

TIPO DE VEHÍCULO	TRANSITO DE DISEÑO	LEF's	N° DE ESAL's
Automóviles y vagonetas	194985089	0,0014	272979,124
Camionetas (2tn)	18941277,4	0,0036	68188,5986
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	3649679,12	0,0100	36496,7912

Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	3458145,91	0,1500	518721,887
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	1166356,91	0,5300	618169,16
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	187203,493	0,1800	33696,6287
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	8626135,46	2,3600	20357679,7
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	896776,459	10,6600	9559637,05
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	1494627,43	4,0600	6068187,37
Camiones semirremolque	3986245,84	1,7600	7015792,68
Camiones remolque	1187086,73	4,3500	5163827,29
Otros vehículos	97276306,4	0,0004	38910,5226

**Fuente:** Elaboración propia.

$$W_{18}' = 49752287.$$

Para este tramo tenemos un factor de distribución de carril de 3 carriles utilizando la tabla 5 tenemos:

$$F_c = 0,6$$

Como el estudio se realiza para un tramo de una sola dirección se tiene 100% de factor de distribución direccional:

$$F_d = 1$$

El número equivalente de ejes de 80 KN (ESAL'S) para una vida útil de 35 años utilizando la ecuación 12 obtenemos:

$$W_{18} = 49752287 * 0,6 * 1$$

$$\mathbf{W_{18} = 29851372.}$$

**b) Avenida Jaime Paz Zamora.**

- **Tránsito promedio diario.**

Realizando el aforo vehicular correspondiente para 10 días se obtuvo un promedio del número de vehículos que transitan a diferentes horarios el cual se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 22: AFORO PROMEDIO EN 10 DÍAS AV. JAIME PAZ.**

		AV. JAIME PAZ ZAMORA				
N°	TIPO DE VEHICULO	7:00 - 8:00	9:00 - 10:00	12:00 - 13:00	17:00 - 18:00	19:00 - 20:00
1	Automoviles y vagonetas	543	422	603	434	599
2	Camionetas (2tn)	68	40	74	36	74
3	Minibuses (hasta 15 pasajeros)	32	25	35	24	27
4	Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	123	104	131	104	116
5	Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	0	0	0	0	0
6	Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	0	0	0	0	0
7	Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	12	8	11	8	13
8	Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	2	2	3	3	10
9	Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	0	0	0	0	0
10	Camiones semiremolque	0	0	0	0	0
11	Camiones remolque	0	0	0	0	0
12	Otros vehículos	69	39	75	39	72

**Fuente:** Elaboración propia.

El aforo vehicular se muestra en el anexo 6.

Continuamos con el cálculo del número vehicular para todas las horas mediante graficas obtenidas utilizando la suma de los dos carriles, estas graficas se realizan para cada tipo de vehículo con el cual obtendremos un volumen de tráfico diario o TPD.

Las gráficas para el desarrollo de la siguiente tabla se muestran en el anexo 7. Las gráficas muestran el número de vehículos que transitan ese tramo en diferentes horarios, la tabla siguiente es la sumatoria de todas las horas dándonos el TPD.

**Tabla 23:** VOLUMEN DE TRAFICO DIARIO AV. JAIME PAZ.

<b>VOLUMEN DE TRÁFICO DIARIO</b>	
<b>TIPO DE VEHÍCULO</b>	<b>AV. JAIME PAZ ZAMORA</b>
Automóviles y vagonetas	6703
Camionetas (2tn)	738
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	379
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	1509
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	0
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	0
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	132
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	47
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	0
Camiones semirremolque	0
Camiones remolque	0
Otros vehículos	748

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Índice de crecimiento.**

El índice de crecimiento lo estimamos mediante el crecimiento vehicular entre los años del diseño, que en nuestro caso el diseño fue realizado en el año 1990.

Se cuenta con un registro del crecimiento del parque automotor según el tipo de vehículo mostrado en el anexo 3, debido a la falta de datos realizaremos una regresión con las ecuaciones ajustadas para los datos con los que contamos. Se realizara un ejemplo de un tipo de vehículo, en este caso de automóviles y vagonetas para tomar como ejemplo el procedimiento de cálculo y una mejor comprensión del mismo.

Las ecuaciones ajustadas son:

**Tabla 24:** ECUACIONES AJUSTADAS DEL CRECIMIENTO DEL PARQUE AUTOMOTOR AV. JAIME PAZ.

ECUACIONES AJUSTADAS DEL CRECIMIENTO DEL PARQUE AUTOMOTOR	
Automóviles y vagonetas	$N^{\circ} = 2E-80e0,098 * \text{Año}$
Camionetas (2tn)	$N^{\circ} = 1E-58e0,0721 * \text{Año}$
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	$N^{\circ} = 4E-90e0,1079 * \text{Año}$
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	$N^{\circ} = 2E-19e0,0264 * \text{Año}$
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	$N^{\circ} = 2E-19e0,0264 * \text{Año}$
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	$N^{\circ} = 2E-39e0,0487 * \text{Año}$
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	$N^{\circ} = 7E-52e0,0643 * \text{Año}$
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	$N^{\circ} = 7E-52e0,0643 * \text{Año}$
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	$N^{\circ} = 7E-52e0,0643 * \text{Año}$
Camiones semiremolque	$N^{\circ} = 2E-252e0,293 * \text{Año}$
Camiones remolque	$N^{\circ} = 7E-186e0,2143 * \text{Año}$
Otros vehículos	$N^{\circ} = 1E-207e0,2428 * \text{Año}$

**Fuente:** Elaboración propia.

Con estas ecuaciones se realizó una serie de relleno para cada tipo de vehículo y para cada año requerido donde se obtuvo un índice de crecimiento para cada vehículo.

Ejemplo Automóviles y vagonetas:

$$N^{\circ} = 2 \times 10^{-80} * e^{0,98 * 1990}$$

$$N^{\circ} = 99344$$

**Tabla 25:** VOLUMEN DE TRÁFICO PARA 1990-1991 AV. JAIME PAZ.

TIPO DE VEHÍCULO	1990	1991
Automóviles y vagonetas	99344	109572
Camionetas (2tn)	20518	22052
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	7148	7963
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	13096	13446
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	13096	13446
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	2454	2576
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	26069	27800
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	26069	27800
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	26069	27800
Camiones semirremolque	34	45
Camiones remolque	1	1
Otros vehículos	690	880

**Fuente:** Elaboración propia.

Ejemplo Automóviles y vagonetas:

$$i = 100 * \frac{109572 - 99344}{109572}$$

$$i = 9,33$$

**Tabla 26:** ÍNDICE DE CRECIMIENTO AV. JAIME PAZ.

TIPO DE VEHÍCULO	INDICE DE CRECIMIENTO
Automóviles y vagonetas	9,33
Camionetas (2tn)	6,96
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	10,23
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	2,60
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	2,60
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	4,74
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	6,23
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	6,23
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	6,23
Camiones semirremolque	24,44
Camiones remolque	0,00
Otros vehículos	21,59

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Factor de crecimiento.**

Utilizando la ecuación 9 realizamos el cálculo del Factor de crecimiento con un periodo de diseño de 35 años y los índices de crecimiento de la tabla anterior.

Ejemplo Automóviles y vagonetas:

$$FC = \frac{\left(1 + \frac{9,34}{100}\right)^{35} - 1}{\frac{9,34}{100}}$$

$$FC = 232,74$$

**Tabla 27:** FACTOR DE CRECIMIENTO AV. JAIME PAZ.

TIPO DE VEHÍCULO	FACTOR DE CRECIMIENTO
Automóviles y vagonetas	232,74
Camionetas (2tn)	136,93
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	286,08
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	56,02
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	56,02
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	85,53
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	116,96
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	116,96
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	116,96

Camiones semirremolque	8624,96
Camiones remolque	35,00
Otros vehículos	39,55

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Tránsito de diseño.**

El tránsito de diseño lo calculamos con la ecuación 10. El tránsito promedio diario es medido en el año 2016, utilizando el índice de crecimiento realizamos una regresión para obtener un tránsito promedio diario estimado para el año 1990 el cual se multiplica con el factor de crecimiento por 365 que es el número de días del año para obtener el tránsito de diseño.

Ejemplo Automóviles y vagonetas:

$$TPD\ 1990 = \frac{6703}{\left(1 + \frac{9,33}{100}\right)^{26}}$$

$$TPD\ 1990 = 659$$

$$\text{Transito de diseño} = 659 * 232,74 * 365$$

$$\text{Transito de diseño} = 55981692,5$$

**Tabla 28:** TRÁNSITO DE DISEÑO AV. JAIME PAZ.

TIPO DE VEHÍCULO	VOLUMEN DE TRAFICO DIARIO 1990	FACTOR DE CRECIMIENTO	TRANSITO DE DISEÑO
Automóviles y vagonetas	659,00	232,74	55981692,5
Camionetas (2tn)	128,00	136,93	6397187,38

Minibuses (hasta 15 pasajeros)	30,00	286,08	3132627,1
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	774,00	56,02	15825287,5
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	0,00	56,02	0
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	0,00	85,53	0
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	27,00	116,96	1152634,88
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	10,00	116,96	426901,808
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	0,00	116,96	0
Camiones semirremolque	0,00	8624,96	0
Camiones remolque	0,00	35,00	0
Otros vehículos	5,00	4333,15	7908000,3

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Factor equivalente de carga (LEF, por sus siglas en ingles)**

El factor equivalente de carga lo obtendremos de las tablas previstas por el manual de la AASHTO, estas tablas son específicas para cada tipo de eje (simple, tándem, tridem) y para una servisiabilidad final dada, se encuentran en el anexo 5.

Para el uso de esta tabla se debe contar con los siguientes datos:

- Numero estructural estimado en este caso utilizaremos de 9”.
- El peso de cada vehículo en KN o Kips.
- Numero de ejes para cada tipo de vehículo.
- Servisiabilidad final en este caso es igual a 2,5.

Los resultados obtenidos de las tablas son:

**Tabla 29:** FACTOR EQUIVALENTE DE CARGA (LEF) AV. JAIME PAZ.

TIPO DE VEHÍCULO	PESO MAXIMO (tn)	PESO TOTAL (KN)	TIPO DE EJE	LEF's
Automóviles y vagonetas	1,5	14,715	SIMPLE	0,0014
Camionetas (2tn)	2	19,62	SIMPLE	0,0036
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	2,4	23,544	SIMPLE	0,0100
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	5,2	51,012	SIMPLE	0,1500
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	7	68,67	SIMPLE	0,5300
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	8,8	86,328	TAMDEM	0,1800
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	10	98,1	SIMPLE	2,3600
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	14,5	142,245	SIMPLE	10,6600
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	18,5	181,485	TAMDEM	4,0600
Camiones semirremolque	20	196,2	TRIDEM	1,7600
Camiones remolque	25	245,25	TRIDEM	4,3500
Otros vehículos	1	9,81	SIMPLE	0,0004

**Fuente:** Elaboración propia.

Calculamos el eje equivalente acumulado ( $W_{18}$ ) multiplicando el tránsito de diseño con el factor equivalente de carga y sumamos el total de cada vehículo:

Ejemplo Automóviles y vagonetas:

$$W_{18} = 55981692,5 * 0,0014$$

$$W_{18} = 78374,3695.$$

**Tabla 30:** N° DE ESAL's PARA CADA TIPO DE VEHÍCULO AV. JAIME PAZ.

TIPO DE VEHÍCULO	TRÁNSITO DE DISEÑO	LEF's	N° DE ESAL's
Automóviles y vagonetas	55981692,5	0,0014	78374,3695
Camionetas (2tn)	6397187,38	0,0036	23029,8746
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	3132627,1	0,0100	31326,271
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	15825287,5	0,1500	2373793,13
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	0	0,5300	0
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	0	0,1800	0
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	1152634,88	2,3600	2720218,32
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	426901,808	10,6600	4550773,28
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	0	4,0600	0
Camiones semirremolque	0	1,7600	0
Camiones remolque	0	4,3500	0
Otros vehículos	7908000,3	0,0004	3163,20012

**Fuente:** Elaboración propia.

$$W_{18}' = 9780678,45.$$

Para este tramo tenemos un factor de distribución de carril de 2 carriles por dirección la tabla 5 tenemos:

$$F_c = 0,8$$

Como el estudio se realiza para un tramo de dos direcciones se tiene 50% de factor de distribución direccional:

$$F_d = 0,5$$

El número equivalente de ejes de 80 KN (ESAL'S) para una vida útil de 35 años utilizando la ecuación 12 obtenemos:

$$W_{18} = 9780678,45 * 0,8 * 0,5$$

$$W_{18} = 3912271,38$$

**c) Ingreso a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.**

- **Transito promedio diario.**

Realizando el aforo vehicular correspondiente para 10 días se obtuvo un promedio del número de vehículos que transitan a diferentes horarios el cual se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 31: AFORO VEHICULAR EN 10 DÍAS INGRESO TERMINAL.**

		INGRESO A LA NUEVA TERMINAL				
N°	TIPO DE VEHICULO	7:00 - 8:00	9:00 - 10:00	12:00 - 13:00	17:00 - 18:00	19:00 - 20:00
1	Automoviles y vagonetas	764	516	1357	1162	1379
2	Camionetas (2tn)	72	80	161	189	176
3	Minibuses (hasta 15 pasajeros)	22	18	58	36	70
4	Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	68	50	85	94	97
5	Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	4	2	2	7	7
6	Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	4	0	2	2	6
7	Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	10	12	34	38	28
8	Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	8	10	4	8	10
9	Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	16	8	12	12	14
10	Camiones semiremolque	1	2	1	1	1
11	Camiones remolque	2	1	1	2	2
12	Otros vehículos	65	68	95	155	111

**Fuente:** Elaboración propia.

El aforo vehicular se muestra en el anexo 8, este aforo fue realizado en la avenida frente a la terminal antigua debido al poco tránsito con el que cuenta la nueva terminal que fue inaugurada recientemente en el año 2017 y en una zona alejada de la ciudad, por estas razones se decide trabajar con el tránsito de la antigua terminal.

Continuamos con el cálculo del número vehicular para todas las horas mediante graficas obtenidas, estas graficas se realizan para cada tipo de vehículo con el cual obtendremos un volumen de tráfico diario o TPD.

Las gráficas para el desarrollo de la siguiente tabla se muestran en el anexo 9. Las gráficas muestran el número de vehículos que transitan ese tramo en diferentes horarios, la tabla siguiente es la sumatoria de todas las horas dándonos el TPD.

**Tabla 32: VOLUMEN DE TRÁFICO DIARIO INGRESO TERMINAL.**

<b>TIPO DE VEHÍCULO</b>	<b>NUEVA TERMINAL</b>
Automóviles y vagonetas	14001
Camionetas (2tn)	1880
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	544
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	1045
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	54
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	31
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	359
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	98
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	156
Camiones semirremolque	17

Camiones remolque	22
Otros vehículos	1357

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Índice de crecimiento.**

El índice de crecimiento lo estimamos mediante el crecimiento vehicular entre los años del diseño, que en nuestro caso el diseño fue realizado en el año 2014.

Se cuenta con un registro del crecimiento del parque automotor según el tipo de vehículo mostrado en el anexo 3, en este caso contamos con los datos de los años requeridos años.

Se realizara un ejemplo de un tipo de vehículo, en este caso de automóviles y vagonetas para tomar como ejemplo el procedimiento de cálculo y una mejor comprensión del mismo.

**Tabla 33:** VOLUMEN DE TRÁFICO PARA 2014-2015 INGRESO TERMINAL.

TIPO DE VEHÍCULO	2014	2015
Automóviles y vagonetas	786235	825500
Camionetas (2tn)	146955	159649
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	79156	85299
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	19256	19400
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	19256	19400
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	9174	9742

Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	112288	116529
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	112288	116529
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	112288	116529
Camiones semirremolque	19642	22583
Camiones remolque	129	137
Otros vehículos	283574	340821

**Fuente:** Elaboración propia.

Ejemplo Automóviles y vagonetas:

$$i = 100 * \frac{825500 - 786235}{825500}$$

$$i = 4,76$$

**Tabla 34:** ÍNDICE DE CRECIMIENTO INGRESO TERMINAL.

TIPO DE VEHÍCULO	INDICE DE CRECIMIENTO
Automóviles y vagonetas	4,76
Camionetas (2tn)	7,95
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	7,20
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	0,74
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	0,74

Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	5,83
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	3,64
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	3,64
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	3,64
Camiones semirremolque	13,02
Camiones remolque	5,84
Otros vehículos	16,80

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Factor de crecimiento.**

Utilizando la ecuación 9 realizamos el cálculo del Factor de crecimiento con un periodo de diseño de 30 años y los índices de crecimiento de la tabla anterior.

Ejemplo Automóviles y vagonetas:

$$FC = \frac{\left(1 + \frac{4,76}{100}\right)^{30} - 1}{\frac{4,76}{100}}$$

$$FC = 63,73$$

**Tabla 35:** FACTOR DE CRECIMIENTO INGRESO TERMINAL.

TIPO DE VEHICULO	FACTOR DE CRECIMIENTO
Automóviles y vagonetas	63,73

Camionetas (2tn)	112,27
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	97,96
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	33,46
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	33,46
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	76,74
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	52,82
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	52,82
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	52,82
Camiones semirremolque	294,52
Camiones remolque	76,86
Otros vehículos	621,67

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Tránsito de diseño.**

El tránsito de diseño lo calculamos con la ecuación 10. El tránsito promedio diario es medido en el año 2016, utilizando el índice de crecimiento realizamos una regresión para obtener un tránsito promedio diario estimado para el año 2014 el cual se multiplica con el factor de crecimiento por 365 que es el número de días del año para obtener el tránsito de diseño..

$$TPD\ 2014 = \frac{14001}{\left(1 + \frac{4,76}{100}\right)^2}$$

$$TPD\ 2014 = 12758$$

$$\text{Tránsito de diseño} = 12758 * 63,73 * 365$$

$$\text{Tránsito de diseño} = 296754150$$

**Tabla 36:** TRÁNSITO DE DISEÑO INGRESO TERMINAL.

TIPO DE VEHÍCULO	VOLUMEN DE TRAFICO DIARIO 2014	FACTOR DE CRECIMIENTO	TRANSITO DE DISEÑO
Automóviles y vagonetas	12758	63,73	296754150
Camionetas (2tn)	1613	112,27	66100756,7
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	473	97,96	16912213,9
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	1030	33,46	12580869,9
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	53	33,46	647365,15
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	28	76,74	784261,008
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	334	52,82	6439715,6
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	91	52,82	1754533,29
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	145	52,82	2795684,92
Camiones semirremolque	13	294,52	1397520,81
Camiones remolque	20	76,86	561070,238
Otros vehículos	995	621,67	225776062

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Factor equivalente de carga (LEF, por sus siglas en ingles)**

El factor equivalente de carga lo obtendremos de las tablas previstas por el manual de la AASHTO, estas tablas son específicas para cada tipo de eje (simple, tándem, tridem) y para una servisiabilidad final dada, se encuentran en el anexo 5.

Para el uso de esta tabla se debe contar con los siguientes datos:

- Numero estructural estimado en este caso utilizaremos de 10<sup>9</sup>.
- El peso de cada vehículo en KN o Kips.
- Numero de ejes para cada tipo de vehículo.
- Servisiabilidad final en este caso es igual a 2,5.

Los resultados obtenidos de las tablas son:

**Tabla 37:** FACTOR EQUIVALENTE DE CARGA (LEF) INGRESO TERMINAL.

TIPO DE VEHÍCULO	PESO MAXIMO (Tn)	PESO TOTAL (KN)	TIPO DE EJE	LEF's
Automóviles y vagonetas	1,5	14,715	SIMPLE	0,0014
Camionetas (2tn)	2	19,62	SIMPLE	0,0036
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	2,4	23,544	SIMPLE	0,0100
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	5,2	51,012	SIMPLE	0,1500
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	7	68,67	SIMPLE	0,5300
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	8,8	86,328	TAMDEM	0,1800
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	10	98,1	SIMPLE	2,4000
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	14,5	142,245	SIMPLE	11,3500

Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	18,5	181,485	TAMDEM	4,2100
Camiones semirremolque	20	196,2	TRIDEM	1,7900
Camiones remolque	25	245,25	TRIDEM	4,5400
Otros vehículos	1	9,81	SIMPLE	0,0004

**Fuente:** Elaboración propia.

Calculamos el eje equivalente acumulado ( $W_{18}'$ ) multiplicando el tránsito de diseño con el factor equivalente de carga y sumamos el total de cada vehículo:

$$W_{18}' = 296754150 * 0,0014$$

$$W_{18}' = 415455,81$$

**Tabla 38:** N° DE ESAL's PARA CADA TIPO DE VEHÍCULO INGRESO TERMINAL.

TIPO DE VEHÍCULO	TRÁNSITO DE DISEÑO	LEF's	N° DE ESAL's
Automóviles y vagonetas	296754150	0,0014	415455,81
Camionetas (2tn)	66100756,7	0,0036	237962,724
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	16912213,9	0,0100	169122,139
Microbuses (hasta 21pjs;2 ejes)	12580869,9	0,1500	1887130,48
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	647365,15	0,5300	343103,53
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	784261,008	0,1800	141166,981

Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	6439715,6	2,4000	15455317,4
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	1754533,29	11,3500	19913952,9
Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	2795684,92	4,2100	11769833,5
Camiones semirremolque	1397520,81	1,7900	2501562,24
Camiones remolque	561070,238	4,5400	2547258,88
Otros vehículos	225776062	0,0004	90310,4246

**Fuente:** Elaboración propia.

$$W_{18}' = 55472177.$$

Para este tramo tenemos un factor de distribución de carril de 2 carriles por dirección la tabla 5 tenemos:

$$F_c = 0,8$$

Como el estudio se realiza para un tramo de dos direcciones se tiene 50% de factor de distribución direccional:

$$F_d = 0,5$$

El número equivalente de ejes de 80 KN (ESAL'S) para una vida útil de 35 años utilizando la ecuación 12 obtenemos:

$$W_{18} = 55472177 * 0,8 * 0,5$$

$$W_{18} = 22188870,8.$$

#### 4.3.3. SERVICIABILIDAD

Dependiendo de la importancia de la vialidad, pueden considerarse los valores  $P_t$  indicados en la tabla 9.

**a) Avenida Circunvalación.**

Se adopta una serviciabilidad inicial ( $P_0$ ) según lo recomendado por el manual AASHTO 93 de 4,5 y una serviciabilidad final ( $P_t$ ) de 2,5 por las características del tramo.

$$P_0 = 4,5$$

$$P_t = 2,5$$

$$\Delta PSI = P_0 - P_t = 4,5 - 2,5 = 2$$

$$\Delta PSI = 2$$

**b) Avenida Jaime Paz Zamora.**

Se adopta una serviciabilidad inicial ( $P_0$ ) según lo recomendado por el manual AASHTO 93 de 4,5 y una serviciabilidad final ( $P_t$ ) de 2,5 por las características del tramo.

$$P_0 = 4,5$$

$$P_t = 2,5$$

$$\Delta PSI = P_0 - P_t = 4,5 - 2,5 = 2$$

$$\Delta PSI = 2$$

**c) Ingreso a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.**

Se adopta una serviciabilidad inicial ( $P_0$ ) según lo recomendado por el manual AASHTO 93 de 4,5 y una serviciabilidad final ( $P_t$ ) de 2,5 por las características del tramo.

$$P_0 = 4,5$$

$$P_t = 2,5$$

$$\Delta PSI = P_0 - P_t = 4,5 - 2,5 = 2$$

$$\Delta PSI = 2$$

#### **4.3.4. MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE (K)**

Este factor nos da idea de cuánto se asienta la subrasante cuando se le aplica un esfuerzo de compresión. Numéricamente, es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada sobre un área de carga, dividido por la deflexión en pulgadas para esa carga. Los valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada por pulgada (pci).

Puesto que la prueba de carga sobre placa, requiere tiempo y es costosa, el valor de k es estimado generalmente por correlación con otros ensayos simples, tal como la razón de soporte california (CBR) o las pruebas de valores R. El resultado es válido porque no se requiere la determinación exacta del valor k; las variaciones normales para un valor estimado no afectarán apreciablemente los requerimientos de espesores del pavimento.

##### **a) Avenida Circunvalación.**

El valor k lo realizamos con el siguiente procedimiento:

El valor de la razón de soporte california (CBR) del suelo natural que vendría a ser nuestra sub rasante es un valor obtenido de un trabajo dirigido interdisciplinario de la U.A.J.M.S. en la carrera de ingeniería civil con el nombre “DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO DE LA AVENIDA CIRCUNVALACIÓN” realizado por el estudiante Rodrigo Jaime Sandoval Tejerina en junio del año 1999<sup>11</sup>. El resultado obtenido por el trabajo interdisciplinario se encuentra en el anexo 10. Este trabajo dio como resultado:

$$\text{CBR} = 4,2\%$$

Para medir la altura de la capa sub base se realizó el ensayo cono dinámico de penetración DCP. Las tablas resultado de los ensayos se muestran en el anexo 11, se hicieron 3 ensayos en el carril de diseño, el resultado del ensayo se ve en la siguiente tabla:

**Tabla 39:** RESULTADOS CONO DINÁMICO DE PENETRACIÓN AV.  
CIRCUNVALACIÓN.

PUNTO	AV. CIRCUNVALACION.			
	CAPA SUB BASE		CAPA SUB RASANTE	
	CBR (%)	H (cm)	CBR (%)	H (cm)
1	44,17	35,50	20,19	34,80
2	49,25	25,40	17,35	34,00
3	44,17	26,20	16,02	33,20
<b>RESULTADO</b>	<b>46</b>	<b>25</b>	<b>18</b>	<b>35</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

Estos valores son el resultado del procedimiento indicado en el apartado **2.7.1.**

El dato que es necesario para el diseño es la altura de la capa sub base.

H = 25cm.

Con los datos de CBR de la sub rasante y la altura de la capa sub base hacemos uso de la tabla 10 interpolamos los valores de 4,2 % de CBR para 25cm. que nos dará el resultado de un aumento de k por el uso de una capa sub base:

**Tabla 40:** INTERPOLACIÓN DE TABLA 10.

Valor soporte de la sub rasante		Valor soporte sobre el sistema estructural (MPA/m), para espesor de base igual		
CBR (%)	k (MPA/m)	Altura de capa sub base (cm)		
		20	<b>25</b>	30
4	30	44	49	54

<b>4,2</b>	<b>30,8</b>	45	<b>50</b>	55
5	34	49	54	59

**Fuente:** Elaboración propia.

Tenemos como resultado un módulo de reacción igual:

**Tabla 41:** VALOR SOPORTE DE LA SUB RASANTE COMBINADA AV. CIRCUNVALACIÓN.

<b>Valor soporte de la sub rasante combinada</b>		
CBR (%)	k (MPA/m)	k (Pci)
<b>10,5</b>	<b>50</b>	<b>184,50</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

#### **b) Avenida Jaime Paz Zamora.**

El valor k lo realizamos con el siguiente procedimiento:

El valor de la razón de soporte california (CBR) del suelo natural que vendría a ser nuestra sub rasante es un valor obtenido de un proyecto de grado de la U.A.J.M.S. en la carrera de ingeniería civil con el nombre “CORRELACION EMPIRICA ENTRE EL C.B.R. (CALIFORNIA BERING RATIO) Y EL PENETROMETRO CON ANILLO DE CARGA” realizado por el estudiante Jorge Armando Bejarano Aguilera<sup>12</sup>. El ensayo fue realizado en el barrio el Tejar que por su proximidad lo utilizaremos como dato. El resultado obtenido por el proyecto de grado se encuentra en el anexo 12. Este trabajo dio como resultado:

$$\mathbf{CBR = 3\%}$$

Para medir la altura de la capa sub base se realizó el ensayo cono dinámico de penetración DCP. Las tablas resultado de los ensayos se muestran en el anexo 13, se hicieron 3 ensayos en el carril de diseño, el resultado del ensayo se ve en la siguiente tabla:

**Tabla 42:** RESULTADOS CONO DINÁMICO DE PENETRACIÓN AV. JAIME PAZ ZAMORA.

PUNTO	AV. JAIME PAZ ZAMORA			
	CAPA SUB BASE		CAPA SUB RASANTE	
	CBR (%)	H (cm)	CBR (%)	H (cm)
1	40,00	31,20	15,29	19,50
2	41,57	31,70	14,59	18,60
3	37,84	33,70	14,22	17,30
<b>RESULTADO</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>20</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

Estos valores son el resultado del procedimiento indicado en el apartado **2.7.1.**

El dato que es necesario para el diseño es la altura de la capa sub base.

H = 30 cm.

Con los datos de CBR de la sub rasante y la altura de la capa sub base hacemos uso de la tabla 10 usamos el valor de 3 % de CBR para 30 cm. que nos dará el resultado de un aumento de k por el uso de una capa sub base:

**Tabla 43:** INTERPOLACIÓN DE LA TABLA 10.

Valor soporte de la sub rasante		Valor soporte sobre el sistema estructural
CBR (%)	k (MPA/m)	Altura de capa sub base (cm)
		30
3	24	<b>45</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

Tenemos como resultado un módulo de reacción igual:

**Tabla 44:** VALOR SOPORTE DE LA SUB RASANTE COMBINADA AV. JAIME PAZ ZAMORA.

Valor soporte de la sub rasante combinada		
CBR (%)	k (MPA/m)	k (Pci)
<b>8,33</b>	<b>45</b>	<b>166,05</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**c) Ingreso a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.**

El valor k lo realizamos con el siguiente procedimiento:

El valor de la razón de soporte california (CBR) del suelo natural que vendría a ser nuestra sub rasante es un valor obtenido de un proyecto de grado de la U.A.J.M.S. en la carrera de ingeniería civil con el nombre “CORRELACION EMPIRICA ENTRE EL C.B.R. (CALIFORNIA BERING RATIO) Y EL PENETROMETRO CON ANILLO DE CARGA” realizado por el estudiante Jorge Armando Bejarano Aguilera. El ensayo fue realizado en el barrio el Tejar que por su proximidad lo utilizaremos como dato. El resultado obtenido por el proyecto de grado se encuentra en el anexo 14. Este trabajo dio como resultado:

$$\mathbf{CBR = 3\%}$$

Para medir la altura de la capa sub base se realizó el ensayo cono dinámico de penetración DCP. Las tablas resultado de los ensayos se muestran en el anexo 15, se hicieron 3 ensayos en una zona descubierto que no fue pavimentado sobre el mismo acceso como se muestra en la imagen del anexo 16, el resultado del ensayo se ve en la siguiente tabla:

**Tabla 45:** RESULTADOS CONO DINÁMICO DE PENETRACIÓN INGRESO  
TERMINAL.

PUNTO	ACCESO NUEVA TERMINAL			
	CAPA SUB BASE		CAPA SUB RASANTE	
	CBR (%)	H (cm)	CBR (%)	H (cm)
1	41,57	33,40	37,23	26,60
2	48,14	37,00	46,78	23,20
3	45,10	38,90	35,89	21,40
<b>RESULTADO</b>	<b>45</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>25</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

Estos valores son el resultado del procedimiento indicado en el apartado **2.7.1**.

El dato que es necesario para el diseño es la altura de la capa sub base.

H = 35 cm.

Con los datos de CBR de la sub rasante y la altura de la capa sub base hacemos uso de la tabla 10 usamos el valor de 3 % de CBR para 30 cm. que nos dará el resultado de un aumento de k por el uso de una capa sub base:

**Tabla 46:** INTERPOLACIÓN DE LA TABLA 10.

Valor soporte de la sub rasante		Valor soporte sobre el sistema estructural (MPA/m), para espesor de		
CBR (%)	k (MPA/m)	Altura de capa sub base (cm)		
				20
3	24	37	45	<b>49</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

Tenemos como resultado un módulo de reacción igual:

**Tabla 47:** VALOR SOPORTE DE LA SUB RASANTE COMBINADA INGRESO TERMINAL.

Valor soporte de la sub rasante combinada		
CBR (%)	k (MPA/m)	k (Pci)
10	49	180,81

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.3.5. MÓDULO DE ROTURA DEL CONCRETO.

##### a) Avenida Circunvalación.

Se realizó el ensayo de extracción de núcleos en 3 puntos del tramo de diseño como se muestra en el anexo 17, con estas muestras obtenidas en campo se realizó el ensayo de rotura del hormigón mostrado en el anexo 18, el dato de la resistencia a compresión del ensayo de rotura se encuentra en el anexo 37 de donde obtuvimos los siguientes valores:

**Tabla 48:** RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO AV. CIRCUNVALACIÓN.

PRUEBA	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c (Psi)
PRUEBA 1	423	6015,06
PRUEBA 2	452	6427,44
PRUEBA 3	398	5659,56
PROMEDIO	424,33	6034,02

**Fuente:** Elaboración propia.

Utilizamos la ecuación 15:

$$S'c = 10 * 6034,02^{0.5}$$

$$S'c = 776,79 \text{ Psi}$$

**b) Avenida Jaime Paz Zamora.**

Se realizó el ensayo de extracción de núcleos en 3 puntos del tramo de diseño como se muestra en el anexo 17, con estas muestras obtenidas en campo se realizó el ensayo de rotura del hormigón mostrado en el anexo 18, el dato de la resistencia a compresión del ensayo de rotura se encuentra en el anexo 37 de donde obtuvimos los siguientes valores:

**Tabla 49:** RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO AV. JAIME PAZ.

PRUEBA	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c (Psi)
PRUEBA 1	357	5076,54
PRUEBA 2	362	5147,64
PRUEBA 3	346	4920,12
PROMEDIO	355	5048,1

**Fuente:** Elaboración propia.

Utilizamos la ecuación 15:

$$S'c = 10 * 5048,1^{0.5}$$

$$S'c = 710,50 \text{ Psi}$$

**c) Ingreso a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.**

En este tramo no se pudo realizar el ensayo de extracción de núcleo debido a que la alcaldía no autorizo por la reciente construcción del pavimento; Se obtuvo información de la empresa constructora de los ensayos de esfuerzo a compresión de donde tomamos como dato el promedio de los resultados obtenidos por todas las probetas de un día de hormigonado, la muestra extraída será durante 3 días diferentes para así conseguir un mejor dato de ingreso con más variables evitando errores inconvenientes. La siguiente tabla muestra el promedio del esfuerzo a compresión de 3 días de vaciado mostrados en el anexo 19.

**Tabla 50:** RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO INGRESO  
TERMINAL.

PRUEBA	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c (Psi)
PRUEBA 1	397	5645,34
PRUEBA 2	343	4877,46
PRUEBA 3	349	4962,78
PROMEDIO	363	5161,86

**Fuente:** Elaboración propia.

Utilizamos la ecuación 15:

$$S'c = 10 * 5161,86^{0.5}$$

$$S'c = 718,46 \text{ Psi}$$

#### 4.3.6. MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO.

Es un parámetro que indica la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tiene una losa de pavimento. Es la relación entre la tensión y la deformación. Las deflexiones, curvaturas y tensiones están directamente relacionadas con el módulo de elasticidad del concreto.

##### a) Avenida Circunvalación.

Utilizamos el mismo dato del módulo de rotura del hormigón mostrado en el apartado 4.3.5. Calculamos el módulo de elasticidad con la ecuación 16.

$$E'c = 57000 * 6034.02^{0.5}$$

$$E'c = 4426205,45 \text{ Psi.}$$

**b) Avenida Jaime Paz Zamora.**

Utilizamos el mismo dato del módulo de rotura del hormigón mostrado en el apartado 4.3.5. Calculamos el módulo de elasticidad con la ecuación 16.

$$E'c = 57000 * 5048,1^{0.5}$$

$$E'c = 4049668,83 \text{ Psi.}$$

**c) Ingreso a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.**

Utilizamos el mismo dato del módulo de rotura del hormigón mostrado en el apartado 4.3.5. Calculamos el módulo de elasticidad con la ecuación 16.

$$E'c = 57000 * 5161,86^{0.5}$$

$$E'c = 4093004,57 \text{ Psi}$$

**4.3.7. DRENAJE.**

De la tabla 11 el método AASHTO (1993) considera para el diseño con un drenaje bueno con una superficie expuesta a humedad de 5% se obtiene para los tres tramos un coeficiente igual a 1,1.

**a) Avenida Circunvalación.**

$$Cd = 1,1$$

**b) Avenida Jaime Paz Zamora.**

$$Cd = 1,1$$

**c) Ingreso a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.**

$$Cd = 1,1$$

**4.3.8. TRANSFERENCIA DE CARGAS.**

De la tabla 12 el método AASHTO (1993) considera para el diseño con soporte lateral y con pasadores se obtiene para los tres tramos un coeficiente de transferencia de carga igual a 2,7.

**a) Avenida Circunvalación.**

El valor escogido para este tramo es de 2,7 debido al ESALs se encuentra de 10 – 30 millones, no tiene soporte lateral pero si cuenta con pasadores.

$$J = 2,7$$

**b) Avenida Jaime Paz Zamora.**

El valor escogido para este tramo es de 2,7 debido al ESALs se encuentra de 3 – 10 millones, no tiene soporte lateral pero si cuenta con pasadores.

$$J = 2,7$$

**c) Ingreso a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.**

El valor escogido para este tramo es de 2,7 debido al ESALs se encuentra de 10 – 30 millones, no tiene soporte lateral pero si cuenta con pasadores.

$$J = 2,7$$

**4.3.9. CONFIABILIDAD.**

De la tabla 7 el método AASHTO (1993) considera para el diseño:

**a) Avenida Circunvalación.**

Para este tramo usaremos una confiabilidad de **90%** es un colector de la zona urbana.

$$R = 90\% ; ZR = -1,282$$

**b) Avenida Jaime Paz Zamora.**

Para este tramo usaremos una confiabilidad de **90%** es un colector de la zona urbana.

$$R = 90\% ; ZR = -1,282$$

**c) Ingreso a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.**

Para este tramo usaremos una confiabilidad de **90%** es un colector de la zona urbana.

$$R = 90\% ; ZR = -1,282$$

#### **4.3.10. DESVIACIÓN ESTÁNDAR.**

De la tabla 6 el método AASHTO (1993) considera para el diseño:

##### **a) Avenida Circunvalación.**

Para este tramo escogemos una desviación estándar de 0,39 por una variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito, debido a que nuestra variable de tránsito fue obtenida estimativamente con los datos actuales para una época pasada, en otras palabras no es un dato exacto.

$$S_o = 0,39$$

##### **b) Avenida Jaime Paz Zamora.**

Para este tramo escogemos una desviación estándar de 0,39 por una variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito, debido a que nuestra variable de tránsito fue obtenida estimativamente con los datos actuales para una época pasada, en otras palabras no es un dato exacto.

$$S_o = 0,39$$

##### **c) Ingreso a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.**

Para este tramo escogemos una desviación estándar de 0,39 por una variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito, porque es un tramo nuevo y su diseño fue calculado con los datos obtenidos en la antigua terminal donde circulan vehículos que no tienen como destino la terminal.

$$S_o = 0,39$$

#### **4.3.11. FACTOR DE SEGURIDAD.**

El método de diseño recomienda que las cargas reales esperadas se multipliquen por unos factores de seguridad, para lo cual se recomiendan los siguientes

**a) Avenida Circunvalación.**

Este tramo se toma un  $FS = 1,2$ . Para vías de carriles múltiples en las que se espere un flujo continuo de tránsito con altos volúmenes de vehículos pesados.

**$FS = 1,2$**

**b) Avenida Jaime Paz Zamora.**

Este tramo se toma un  $FS = 1,2$ . Para vías de carriles múltiples en las que se espere un flujo continuo de tránsito con altos volúmenes de vehículos pesados.

**$FS = 1,2$**

**c) Ingreso a la nueva terminal de la ciudad de Tarija.**

Este tramo se toma un  $FS = 1,2$ . Para vías de carriles múltiples en las que se espere un flujo continuo de tránsito con altos volúmenes de vehículos pesados.

**$FS = 1,2$**

#### 4.3.12. TABLA DE RESUMEN.

**Tabla 51:** RESUMEN DE VALORES DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO.

PARÁMETROS DE DISEÑO	TRAMO		
	CIRCUNVALACIÓN	JAIME PAZ ZAMORA	NUEVA TERMINAL
W18 (Tiempo 1)	29851372,08	3912271,38	22188870,82
W18 (Tiempo 2)	20488812,17	1737715,72	21400597,52
W18 (Tiempo 3)	6763613,02	2481788,10	825115,09
Po	4,5	4,5	4,5
Pt	2,5	2,5	2,5
k (Pci)	184,5	166,05	180,81
S'c (Psi)	776,79	710,50	718,46
E'c (Psi)	4426205,45	4049668,83	4093004,57
Cd	1,1	1,1	1,1
J	2,7	2,7	2,7
R (%)	90	90	90
ZR	-1,282	-1,282	-1,282
So	0,39	0,39	0,39
FS	1,2	1,2	1,2

**Fuente:** Elaboración propia.

#### **4.4. APLICACIÓN DEL SOFTWARE PCA-CÁLCULO.**

El cálculo se realizara en tres tiempos de estudio:

- El primero es el tiempo en el que el paquete estructural fue diseñado con un periodo de diseño igual a su vida útil que es específica para cada tramo.
- El segundo es el tiempo en el que realizamos el estudio actual es decir con un periodo de diseño que es la diferencia de la vida útil con el tiempo transcurrido desde su ejecución.
- El tercero es el tiempo en el que el periodo de diseño es el tiempo transcurrido desde su ejecución hasta la actualidad.

Estos tres cálculos son necesarios para estudiar el comportamiento del paquete estructural, si existe un sub dimensionamiento, el comportamiento del tráfico, si existe deterioro del pavimento, etc.

##### **4.4.1. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO.**

###### **4.4.1.1.AVENIDA CIRCUNVALACIÓN.**

Ahora ingresamos nuestros datos y se le de valor al espesor de la losa y apretamos el botón calcular cambiando los valores del espesor hasta que el resultado del porcentaje de fatiga y erosión se encuentren dentro de los limites es decir no superen el 100%.

- a) Tiempo 1 = Es el tiempo en el que el paquete estructural fue diseñado con un periodo de diseño igual a su vida útil que es específica para cada tramo.

$$W18 \text{ (Tiempo 1)} = 29851372,08$$

$$S'_c = 776,79 \text{ Psi}$$

$$\text{Dovelas} = \text{Si}$$

$$\text{Bermas} = \text{No}$$

$$K = 184,5 \text{ Pci}$$

$$F_s = 1,2$$

**Ilustración 36: ANÁLISIS DE CÁLCULO DEL SOFTWARE PCA-CÁLCULO  
AV. CIRCUNVALACIÓN (TEMPO 1).**

The screenshot shows the PCA-Cálculo software interface with the following data:

**Datos generales:**  
 Proyecto: Av. Circunvalacion  
 Descripción: Tiempo 1  
 Período de diseño: 35 años  
 Espesor de la losa: 9 in  
 Módulo de rotura: 776.79 psi  
 Dovelas:  Sí  No  
 Bermas:  Sí  No  
 Módulo de reacción de la subrasante (K)  
 Subrasante  
 Ingreso directo K = 184.5 pci  
 Correlación con CBR CBR =  
 Subbase  
 Espesor: 0 in  
 Sin tratar  Tratada con cemento

**Tránsito:**  
 Factor de seguridad: 1.2  
 Tipo de Ejes: Ejes Simples  
 Ejes Simples kips

Carga	Repeticiones
18	2.9851e+07
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

**Barras de anclaje:**  
 Diámetro de barra: 3/8" in  
 Acero (fy): 280 MPa  
 Ancho de carril: 3.05 m

**Análisis:**  
 Calcular  
 Espesor de losa: 9 in  
 Módulo de rotura: 776.79 psi  
 K del conjunto: 185 pci  
 Período de diseño: 35 años  
 Porcentaje de fatiga: 0.00  
 Porcentaje de erosión: 90.59  
 Recomendación para barras de anclaje:  
 Longitud: 18 in  
 Separación entre barras: 18 in  
 Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):  
 Longitud: 16 in  
 Separación entre barras: 12 in  
 Diámetro de barras: 1.13 in  
 Análisis de sensibilidad  
 Guardar Abrir  
 TXT Salir

Sistema de unidades:  SI  Inglés

**Fuente:** Software PCA-cálculo.

En este caso se obtuvo un valor de **9 pulgadas** que son 22,6 cm que tomaremos como un diseño de **23cm**.

Porcentaje por fatiga = 0% < 100%

Porcentaje por erosión = 90,59% < 100%

El programa nos muestra una recomendación para las barras de anclaje y para los pasadores.



En este caso se obtuvo un valor de **8,7 pulgadas** que son 22,1 cm que tomaremos como un diseño de **23cm**.

Porcentaje por fatiga =  $0\% < 100\%$

Porcentaje por erosión =  $96,73\% < 100\%$

- c) Tiempo 3 = Es el tiempo en el que el periodo de diseño es el tiempo transcurrido desde su ejecución hasta la actualidad.

W18 (Tiempo 3) = 6763613,02

S'c = 776,79 Psi

Dovelas = Si

Bermas = No

K = 184,5 Pci

Fs=1,2

**Ilustración 38: ANÁLISIS DE CÁLCULO DEL SOFTWARE PCA-CÁLCULO  
AV. CIRCUNVALACIÓN (TEMPO 3).**

The screenshot shows the PCA-cálculo software interface with the following data:

**Datos generales:**  
 Proyecto: Av. Circunvalacion  
 Descripción: Tiempo 3  
 Período de diseño: 18 años  
 Espesor de la losa: 7.9 in  
 Módulo de rotura: 776.79 psi  
 Dovelas: Si  
 Bermas: No  
 Módulo de reacción de la subrasante (K):  
 Subrasante: Ingreso directo, K = 184.5 pci  
 Correlación con CBR: No  
 Subbase: No  
 Espesor: 0 in  
 Sin tratar

**Tránsito:**  
 Factor de seguridad: 1.2  
 Tipo de Ejes: Ejes Simples  
 Ejes Simples kips:

Carga	Repeticiones
18	6.7636e+06
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

**Barros de anclaje:**  
 Diámetro de barra: 3/8" in  
 Acero (fy): 280 MPa  
 Ancho de carril: 3.05 m

**Análisis:**  
 Calcular  
 Espesor de losa: 7.9 in  
 Módulo de rotura: 776.79 psi  
 K del conjunto: 185 pci  
 Período de diseño: 18 años  
 Porcentaje de fatiga: 0.00  
 Porcentaje de erosión: 94.56  
 Recomendación para barras de anclaje:  
 Longitud: 18 in  
 Separación entre barras: 22 in  
 Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):  
 Longitud: 16 in  
 Separación entre barras: 12 in  
 Diámetro de barras: 1.13 in  
 Análisis de sensibilidad  
 Guardar, Abrir, TXT, Salir

Sistema de unidades: SI, Inglés

**Fuente:** Software PCA-cálculo.

En este caso se obtuvo un valor de **7,9 pulgadas** que son 20,1 cm que tomaremos como un diseño de **21cm**.

Porcentaje por fatiga = 0% < 100%

Porcentaje por erosión = 94,56% < 100%

**4.4.1.2.AVENIDA JAIME PAZ ZAMORA.**

Ingresamos nuestros datos y se le de valor al espesor de la losa y apretamos el botón calcular cambiando los valores del espesor hasta que el resultado del porcentaje de fatiga y erosión se encuentren dentro de los límites es decir no superen el 100%.

- a) Tiempo 1 = Es el tiempo en el que el paquete estructural fue diseñado con un periodo de diseño igual a su vida útil que es específica para cada tramo.

$$W18 (\text{Tiempo } 1) = 3912271,38$$

$$S'c = 710,5 \text{ Psi}$$

$$\text{Dovelas} = \text{Si}$$

$$\text{Bermas} = \text{No}$$

$$K = 166,05 \text{ Pci}$$

$$F_s = 1,2$$



$W_{18}$  (Tiempo 2) = 1737715,72

$S'_c = 710,5$  Psi

Dovelas = Si

Bermas = No

$K = 166,05$  Pci

$F_s = 1,2$

**Ilustración 40:** ANÁLISIS DE CÁLCULO DEL SOFTWARE PCA-CÁLCULO  
AV. JAIME PAZ (TIEMPO 2).

The screenshot shows the PCA-cálculo software interface with the following data and results:

**Datos generales:**

- Proyecto: Av. Jaime Paz Zamora
- Descripción: Tiempo 2
- Periodo de diseño: 26 años
- Espesor de la losa: 7.2 in
- Módulo de rotura: 710.5 psi
- Dovelas:  Si  No
- Bermas:  Si  No
- Módulo de reacción de la subrasante (K):
  - Subrasante:  Ingreso directo  $K = 166.05$  pci
  - Correlación con CBR
- Subbase:  Subbase
  - Espesor: 0 in
  - Sin tratar  Tratada con cemento

**Tránsito:**

- Factor de seguridad: 1.2
- Tipo de Ejes: Ejes Simples
- Ejes Simples kips

Carga	Repeticiones
18	1.7377e+06
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

**Barras de anclaje:**

- Diámetro de barra: 3/8" in
- Acero (fy): 280 MPa
- Ancho de carril: 3.05 m

**Análisis:**

- Calcular
- Espesor de losa: 7.2 in
- Módulo de rotura: 710.5 psi
- K del conjunto: 166 pci
- Periodo de diseño: 26 años
- Porcentaje de fatiga: 96.53
- Porcentaje de erosión: 61.82
- Recomendación para barras de anclaje:
  - Longitud: 18 in
  - Separación entre barras: 24 in
- Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):
  - Longitud: 14 in
  - Separación entre barras: 12 in
  - Diámetro de barras: 1.00 in
- Análisis de sensibilidad
- Guardar
- Abrir
- TXT
- Salir

Sistema de unidades:  SI  Inglés

**Fuente:** Software PCA-cálculo.

En este caso se obtuvo un valor de **7,2 pulgadas** que son 18,3 cm que tomaremos como un diseño de **19 cm**.

Porcentaje por fatiga = 96,53% < 100%

Porcentaje por erosión = 61,82% < 100%

- c) Tiempo 3 = Es el tiempo en el que el periodo de diseño es el tiempo transcurrido desde su ejecución hasta la actualidad.

W18 (Tiempo 3) = 2481788,1

S'c = 710,5 Psi

Dovelas = Si

Bermas = No

K = 166,05 Pci

Fs = 1,2

**Ilustración 41: ANÁLISIS DE CÁLCULO DEL SOFTWARE PCA-CÁLCULO  
AV. JAIME PAZ (TIEMPO 3).**

The screenshot shows the PCAcalculo software interface with the following data:

**Datos generales:**  
 Proyecto: Av. Jaime Paz Zamora  
 Descripción: Tiempo 3  
 Período de diseño: 9 años  
 Espesor de la losa: 7.3 in  
 Módulo de rotura: 710.5 psi  
 Dovelas:  Si  No  
 Bermas:  Si  No

**Módulo de reacción de la subrasante (K):**  
 Subrasante:  Ingreso directo (K = 166.05 pci)  Correlación con CBR (CBR = )

**Tránsito:**  
 Factor de seguridad: 1.2  
 Tipo de Ejes: Ejes Simples  
 Ejes Simples kips:

Carga	Repeticiones
18	2.4818e+06
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

**Barras de anclaje:**  
 Diámetro de barra: 3/8" in  
 Acero (fy): 280 MPa  
 Ancho de carril: 3.05 m

**Análisis:**  
 Espesor de losa: 7.3 in  
 Módulo de rotura: 710.5 psi  
 K del conjunto: 166 pci  
 Período de diseño: 9 años  
 Porcentaje de fatiga: 72.23%  
 Porcentaje de erosión: 77.53%

Recomendación para barras de anclaje:  
 Longitud: 18 in  
 Separación entre barras: 24 in

Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):  
 Longitud: 14 in  
 Separación entre barras: 12 in  
 Diámetro de barras: 1.00 in

Botones: **Calcular**, **Guardar**, **Abrir**, **TXT**, **Salir**

Sistema de unidades:  SI  Inglés

**Fuente:** Software PCA-cálculo.

En este caso se obtuvo un valor de **7,3 pulgadas** que son 18,5 cm que tomaremos como un diseño de **19 cm**.

Porcentaje por fatiga = 72,23% < 100%      Porcentaje por erosión = 77,53% < 100%

#### 4.4.1.3.INGRESO A LA TERMINAL NUEVA.

Ingresamos nuestros datos y se le da valor al espesor de la losa y apretamos el botón calcular cambiando los valores del espesor hasta que el resultado del porcentaje de fatiga y erosión se encuentren dentro de los límites es decir no superen el 100%.



En este caso se obtuvo un valor de **8,8 pulgadas** que son 22,4 cm que tomaremos como un diseño de **23 cm**.

Porcentaje por fatiga =  $0\% < 100\%$

Porcentaje por erosión =  $91,28\% < 100\%$

- b) Tiempo 2 = Es el tiempo en el que realizamos el estudio actual es decir con un periodo de diseño que es la diferencia de la vida útil con el tiempo transcurrido desde su ejecución.

$W18$  (Tiempo 2) = 21400597,52

$S'_c = 718,46$  Psi

Dovelas = Si

Bermas = No

$K = 180,81$  Pci

$F_s = 1,2$



$S'_c = 718,46 \text{ Psi}$

Dovelas = Si

Bermas = No

$K = 180,81 \text{ Pci}$

$F_s = 1,2$

**Ilustración 44:** ANÁLISIS DE CÁLCULO DEL SOFTWARE PCA-CÁLCULO  
INGRESO TERMINAL (TIEMPO 3).

The screenshot shows the PCA-Cálculo software interface with the following data:

**Datos generales:**  
 Proyecto: Nueva terminal  
 Descripción: Tiempo 3  
 Período de diseño: 2 años  
 Espesor de la losa: 7 in  
 Módulo de rotura: 718.46 psi  
 Dovelas:  Si  No  
 Bermas:  Si  No

**Módulo de reacción de la subrasante (K):**  
 Subrasante:  
 Ingreso directo  $K = 180.81 \text{ pci}$   
 Correlación con CBR  
 CBR =

**Tránsito:**  
 Factor de seguridad: 1.2  
 Tipo de Ejes: Ejes Simples  
**Ejes Simples kips**

Carga	Repeticiones
18	8.2512e+05
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

**Barras de anclaje:**  
 Diámetro de barra: 3/8" in  
 Acero (fy): 280 MPa  
 Ancho de carril: 3.05 m

**Análisis:**  
 Calcular  
 Espesor de losa: 7 in  
 Módulo de rotura: 718.46 psi  
 K del conjunto: 181 pci  
 Período de diseño: 2 años  
**Porcentaje de fatiga: 66.97**  
**Porcentaje de erosión: 37.47**  
 Recomendación para barras de anclaje:  
 Longitud: 18 in  
 Separación entre barras: 24 in  
 Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):  
 Longitud: 14 in  
 Separación entre barras: 12 in  
 Diámetro de barras: 0.87 in

Sistema de unidades:  SI  Inglés

**Fuente:** Software PCA-cálculo.

En este caso se obtuvo un valor de **7 pulgadas** que son 17,8 cm que tomaremos como un diseño de **18 cm**.

Porcentaje por fatiga = 66,97% < 100%

Porcentaje por erosión = 37,47% < 100%

#### **4.5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS TRADICIONALES DE DIMENSIONAMIENTO.**

##### **4.5.1. MÉTODO AASHTO-93.**

El método AASHTO-93 es un procedimiento simple en el que se despeja la variable (D) que es el espesor del pavimento obteniendo el diseño.

##### **4.5.1.1. AVENIDA CIRCUNVALACIÓN.**

Utilizando la ecuación 8 reemplazamos los valores con los datos previstos para cada tiempo:

**Tabla 52:** DATOS DE ENTRADA MÉTODO AASHTO 93 AV. CIRCUNVALACIÓN.

PARÁMETROS DE DISEÑO	TRAMO
	CIRCUNVALACIÓN
W18 (Tiempo 1)	29851372,08
W18 (Tiempo 2)	20488812,17
W18 (Tiempo 3)	6763613,02
Po	4,5
Pt	2,5
k (Pci)	184,5

S'c (Psi)	776,78
E'c (Psi)	4426205,451
Cd	1,1
J	2,7
R (%)	90
ZR	-1,282
So	0,39

**Fuente:** Elaboración propia.

a) Tiempo 1

$$\begin{aligned} \text{Log}(29851372) = & -1,282 * 0,39 + 7,35 * \text{Log}(D + 1) - 0,06 + \frac{\text{Log}\left(\frac{2}{4,5 - 1,5}\right)}{\frac{1,624 \times 10^7}{(D + 1)^{3,46}}} \\ & + (4,22 - 0,32 * 2,5) * \text{Log}\left(\frac{776,8 * 1,1 * (D^{0,75} - 1,132)}{215,62 * 2,7 * \frac{18,42}{\left(\frac{4426205,45}{184,5}\right)^{0,25}}}\right) \end{aligned}$$

**D = 9,6 plg.**

**D = 25 cm.**

b) Tiempo 2

$$\begin{aligned} \text{Log}(20488812) = & -1,282 * 0,39 + 7,35 * \text{Log}(D + 1) - 0,06 + \frac{\text{Log}\left(\frac{2}{4,5 - 1,5}\right)}{\frac{1,624x10^7}{(D + 1)^{3,46}}} \\ & + (4,22 - 0,32 * 2,5) * \text{Log}\left(\frac{776,8 * 1,1 * (D^{0,75} - 1,132)}{215,62 * 2,7 * \frac{18,42}{\left(\frac{4426205,45}{184,5}\right)^{0,25}}}\right) \end{aligned}$$

**D = 9 plg.**

**D = 23 cm.**

c) Tiempo 3

$$\begin{aligned} \text{Log}(6763613) = & -1,282 * 0,39 + 7,35 * \text{Log}(D + 1) - 0,06 + \frac{\text{Log}\left(\frac{2}{4,5 - 1,5}\right)}{\frac{1,624x10^7}{(D + 1)^{3,46}}} \\ & + (4,22 - 0,32 * 2,5) * \text{Log}\left(\frac{776,8 * 1,1 * (D^{0,75} - 1,132)}{215,62 * 2,7 * \frac{18,42}{\left(\frac{4426205,45}{184,5}\right)^{0,25}}}\right) \end{aligned}$$

**D = 7,5 plg.**

**D = 20 cm.**

#### **4.5.1.2. AVENIDA JAIME PAZ ZAMORA.**

Utilizando la ecuación 8 reemplazamos los valores con los datos previstos para cada tiempo:

**Tabla 53:** DATOS DE ENTRADA MÉTODO AASHTO 93 AV. JAIME PAZ.

PARÁMETROS DE DISEÑO	TRAMO
	JAIME PAZ ZAMORA
W18 (Tiempo 1)	3912271,379
W18 (Tiempo 2)	1737715,721
W18 (Tiempo 3)	2481788,103
Po	4,5
Pt	2,5
k (Pci)	166,05
S'c (Psi)	710,49
E'c (Psi)	4049668,832
Cd	1,1
J	2,7
R (%)	90
ZR	-1,282
So	0,39

**Fuente:** Elaboración propia.

a) Tiempo 1

$$\begin{aligned} \text{Log}(3912271,4) = & -1,282 * 0,39 + 7,35 * \text{Log}(D + 1) - 0,06 + \frac{\text{Log}\left(\frac{2}{4,5 - 1,5}\right)}{\frac{1,624x10^7}{(D + 1)^{3,46}}} + (4,22 - 0,32 * 2,5) \\ & * \text{Log}\left(\frac{710,5 * 1,1 * (D^{0,75} - 1,132)}{215,62 * 2,7 * \frac{18,42}{\left(\frac{4049668,8}{166,05}\right)^{0,25}}}\right) \end{aligned}$$

**D = 7,2 plg.**

**D = 19 cm.**

b) Tiempo 2

$$\begin{aligned} \text{Log}(1737715,7) = & -1,282 * 0,39 + 7,35 * \text{Log}(D + 1) - 0,06 + \frac{\text{Log}\left(\frac{2}{4,5 - 1,5}\right)}{\frac{1,624x10^7}{(D + 1)^{3,46}}} + (4,22 - 0,32 * 2,5) \\ & * \text{Log}\left(\frac{710,5 * 1,1 * (D^{0,75} - 1,132)}{215,62 * 2,7 * \frac{18,42}{\left(\frac{4049668,8}{166,05}\right)^{0,25}}}\right) \end{aligned}$$

**D = 6,2 plg.**

**D = 16 cm.**

c) Tiempo 3

$$\begin{aligned} \text{Log}(2481788,1) \\ = & -1,282 * 0,39 + 7,35 * \text{Log}(D + 1) - 0,06 + \frac{\text{Log}\left(\frac{2}{4,5 - 1,5}\right)}{\frac{1,624x10^7}{(D + 1)^{3,46}}} + (4,22 - 0,32 * 2,5) \\ & * \text{Log}\left(\frac{710,5 * 1,1 * (D^{0,75} - 1,132)}{215,62 * 2,7 * \frac{18,42}{\left(\frac{4049668,8}{166,05}\right)^{0,25}}}\right) \end{aligned}$$

**D = 6,6 plg.**

**D = 17 cm.**

#### 4.5.1.3. INGRESO TERMINAL NUEVA.

Utilizando la ecuación 8 reemplazamos los valores con los datos previstos:

**Tabla 54:** DATOS DE ENTRADA MÉTODO AASHTO93 INGRESO TERMINAL.

PARÁMETROS DE DISEÑO	TRAMO
	NUEVA TERMINAL
W18 (Tiempo 1)	22188870,82
W18 (Tiempo 2)	21400597,52
W18 (Tiempo 3)	825115,0867
Po	4,5
Pt	2,5
k (Pci)	180,81
S'c (Psi)	718,46
E'c (Psi)	4093004,58
Cd	1,1
J	2,7
R (%)	90
ZR	-1,282
So	0,39

**Fuente:** Elaboración propia.

a) Tiempo 1

$$\begin{aligned} \text{Log}(22188870,8) = & -1,282 * 0,39 + 7,35 * \text{Log}(D + 1) - 0,06 + \frac{\text{Log}\left(\frac{2}{4,5 - 1,5}\right)}{\frac{1,624 \times 10^7}{(D + 1)^{3,46}}} + (4,22 - 0,32 * 2,5) \\ & * \text{Log}\left(\frac{718,46 * 1,1 * (D^{0,75} - 1,132)}{215,62 * 2,7 * \frac{18,42}{\left(\frac{4093004,58}{180,81}\right)^{0,25}}}\right) \end{aligned}$$

**D = 9,5 plg.**

**D = 25 cm.**

b) Tiempo 2

$$\begin{aligned} \text{Log}(21400597,5) = & -1,282 * 0,39 + 7,35 * \text{Log}(D + 1) - 0,06 + \frac{\text{Log}\left(\frac{2}{4,5 - 1,5}\right)}{\frac{1,624 \times 10^7}{(D + 1)^{3,46}}} + (4,22 - 0,32 * 2,5) \\ & * \text{Log}\left(\frac{718,46 * 1,1 * (D^{0,75} - 1,132)}{215,62 * 2,7 * \frac{18,42}{\left(\frac{4093004,58}{180,81}\right)^{0,25}}}\right) \end{aligned}$$

**D = 9,4 plg.**

**D = 24 cm.**

c) Tiempo 3

$$\begin{aligned} \text{Log}(825115) = & -1,282 * 0,39 + 7,35 * \text{Log}(D + 1) - 0,06 + \frac{\text{Log}\left(\frac{2}{4,5 - 1,5}\right)}{\frac{1,624 \times 10^7}{(D + 1)^{3,46}}} + (4,22 - 0,32 * 2,5) \\ & * \text{Log}\left(\frac{718,46 * 1,1 * (D^{0,75} - 1,132)}{215,62 * 2,7 * \frac{18,42}{\left(\frac{4093004,58}{180,81}\right)^{0,25}}}\right) \end{aligned}$$

**D = 1,8 plg.**

**D = 5 cm.**

#### 4.5.2. MÉTODO PCA.

El diseño del espesor de pavimento rígido utilizando el método PCA se lo realiza verificando el análisis por fatiga y erosión sean menores al 100%.

El método PCA sigue un procedimiento de cálculo con repetidas iteraciones para lograr un diseño óptimo es decir que su análisis de fatiga y de erosión sea menor al 100% y mayor a 0% eso nos indica que el paquete no está sobre dimensionado.

Empezamos con una hoja de cálculo prevista por el manual de la PCA:

**Tabla 55:** FORMATO DE CÁLCULO MÉTODO PCA.

CARGA POR EJE	FS	REPETICIONES ESPERADAS	REP. PERMISIBLES	%FATIGA	REP. PERMISIBLES	% DE DAÑO
1	2	3	4	5	6	7

**Fuente:** Portland Cement Association. (1995).

Los datos de entrada son el módulo de rotura del hormigón, el módulo de reacción de la sub rasante, el factor de seguridad, la carga por eje, repeticiones esperadas y el espesor del pavimento que lo estimaremos hasta obtener un espesor adecuado.

Seguimos el siguiente procedimiento:

- En la columna 1 se ingresa el valor de carga por eje, en la columna 2 se multiplica la carga por el factor de seguridad, en la columna 3 se ingresa las repeticiones esperadas es el valor que calculamos el número ESALs.
- Realizamos el análisis de fatiga obteniendo el valor de esfuerzo equivalente de la tabla en el anexo 21 ingresando con el valor estimado de espesor de losa en pulgadas y el valor k de la subrasante. Se divide el esfuerzo equivalente entre el módulo de rotura obteniendo el factor de relación de esfuerzo. Ingresamos con la figura del anexo 23 con los datos de la columna 2 y el factor de relación de esfuerzo y obtenemos las repeticiones permisibles e ingresamos en la

columna 4. Dividimos la columna 3 entre la columna 4 y multiplicamos por 100 y ese es el porcentaje de fatiga que se coloca en la columna 5.

- Realizamos el análisis de erosión obteniendo el factor de erosión de la tabla en el anexo 22 ingresando con el valor estimado de espesor de losa en pulgadas y el valor k de la subrasante. Ingresamos con la figura del anexo 24 con los datos de la columna 2 y el factor de erosión y obtenemos las repeticiones permisibles e ingresamos en la columna 6. Dividimos la columna 3 entre la columna 6 y multiplicamos por 100 y ese es el porcentaje de erosión que se coloca en la columna 7.

#### 4.5.2.1. AVENIDA CIRCUNVALACIÓN.

Utilizando el procedimiento indicado en el anterior punto realizamos las operaciones necesarias para obtener el diseño adecuado.

**Tabla 56:** DATOS DE ENTRADA MÉTODO PCA AV. CIRCUNVALACIÓN.

PARÁMETROS DE DISEÑO	TRAMO
	CIRCUNVALACIÓN
W18 (Tiempo 1)	29851372,08
W18 (Tiempo 2)	20488812,17
W18 (Tiempo 3)	6763613,02
k (Pci)	184,5
S'c (Psi)	776,78
FS	1,2

**Fuente:** Elaboración propia.

a) Tiempo 1

Carga por eje = 18 kips.

Factor de seguridad = 1,2

Repeticiones esperadas 29851372,08 ( eje simple )

K = 184, 5 pci.

Sc = 776,8 psi.

**Tabla 57:** CÁLCULO MÉTODO PCA AV. CIRCUNVALACIÓN (TIEMPO 1).

CARGA POR EJE	FS	REPETICIONES ESPERADAS	REP. PERMISIBLES	%FATIGA	REP. PERMISIBLES	% DE DAÑO
1	2	3	4	5	6	7
18	22	29851372	ILIMITADO	0	30000000	99,5

**Fuente:** Elaboración propia.

Las tablas para obtener el valor de esfuerzo equivalente y el factor de erosión se encuentran en el anexo 21 y 22. Las gráficas de cálculo para las repeticiones permisibles se encuentran en el anexo 25.

Esfuerzo equivalente = 209,45

Factor de relación de esfuerzo = 0,269

Factor de erosión = 2,65

Porcentaje por fatiga = 0% < 100%

Porcentaje por erosión = 99,05% < 100%

**Espesor de losa = 9,1 plg.**

**Espesor de losa = 24 cm.**

## b) Tiempo 2

Carga por eje = 18 kips.

Factor de seguridad = 1,2

Repeticiones esperadas = 20488812,2 ( eje simple )

K = 184, 5 pci.

Sc = 776,8 psi.

**Tabla 58:** CÁLCULO MÉTODO PCA AV. CIRCUNVALACIÓN (TIEMPO 2).

CARGA POR EJE	FS	REPETICIONES ESPERADAS	REP. PERMISIBLES	%FATIGA	REP. PERMISIBLES	% DE DAÑO
1	2	3	4	5	6	7
18	22	20488812,2	ILIMITADO	0	21000000	97,57

**Fuente:** Elaboración propia.

Las tablas para obtener el valor de esfuerzo equivalente y el factor de erosión se encuentran en el anexo 21 y 22. Las gráficas de cálculo para las repeticiones permisibles se encuentran en el anexo 26.

Esfuerzo equivalente = 216,13

Factor de relación de esfuerzo = 0,278

Factor de erosión = 2,68

Porcentaje por fatiga = 0% < 100%

Porcentaje por erosión = 97,57% < 100%

**Espesor de losa = 8,9 plg.**

**Espesor de losa = 23 cm.**

c) Tiempo 3

Carga por eje = 18 kips.

Factor de seguridad = 1,2

Repeticiones esperadas = 6675650,9 ( eje simple )

K = 184, 5 pci.

Sc = 776,8 psi.

**Tabla 59:** CÁLCULO MÉTODO PCA AV. CIRCUNVALACIÓN (TIEMPO 3).

CARGA POR EJE	FS	REPETICIONES ESPERADAS	REP. PERMISIBLES	%FATIGA	REP. PERMISIBLES	% DE DAÑO
1	2	3	4	5	6	7
18	22	6763613	ILIMITADO	0	7000000	96,62

**Fuente:** Elaboración propia.

Las tablas para obtener el valor de esfuerzo equivalente y el factor de erosión se encuentran en el anexo 21 y 22. Las gráficas de cálculo para las repeticiones permisibles se encuentran en el anexo 27.

Esfuerzo equivalente = 246,83

Factor de relación de esfuerzo = 0,317

Factor de erosión = 2,8

Porcentaje por fatiga = 0% < 100%

Porcentaje por erosión = 96,62% < 100%

**Espesor de losa = 8,1 plg.**

**Espesor de losa = 21 cm.**

#### 4.5.2.2.AVENIDA JAIME PAZ ZAMORA.

Utilizando el procedimiento indicado en el anterior punto realizamos las operaciones necesarias para obtener el diseño adecuado.

**Tabla 60:** DATOS DE ENTRADA METODO PCA AV. JAIME PAZ.

PARÁMETROS DE DISEÑO	TRAMO
	JAIME PAZ ZAMORA
W18 (Tiempo 1)	3912271,379
W18 (Tiempo 2)	1737715,721
W18 (Tiempo 3)	2481788,103
k (Pci)	166,05
S'c (Psi)	710,5
FS	1,2

**Fuente:** Elaboración propia.

a) Tiempo 1

Carga por eje = 18 kips.

Factor de seguridad = 1,2

Repeticiones esperadas = 3912271,38 ( eje simple )

K = 166,05 pci.

Sc = 710,5 psi.

**Tabla 61:** CÁLCULO MÉTODO PCA AV. JAIME PAZ (TIEMPO 1).

CARGA POR EJE	FS	REPETICIONES ESPERADAS	REP. PERMISIBLES	%FATIGA	REP. PERMISIBLES	% DE DAÑO
1	2	3	4	5	6	7
18	22	3912271,38	ILIMITADO	0	4000000	97,81

**Fuente:** Elaboración propia.

Las tablas para obtener el valor de esfuerzo equivalente y el factor de erosión se encuentran en el anexo 21 y 22. Las gráficas de cálculo para las repeticiones permisibles se encuentran en el anexo 28.

Esfuerzo equivalente = 264,82.

Factor de relación de esfuerzo = 0,37.

Factor de erosión = 2,88.

Porcentaje por fatiga = 0% < 100%

Porcentaje por erosión = 97,81% < 100%

**Espesor de losa = 7,6 plg.**

**Espesor de losa = 20 cm.**

b) Tiempo 2

Carga por eje = 18 kips.

Factor de seguridad = 1,2

Repeticiones esperadas = 1737715,7 ( eje simple )

K = 166,05 pci.

Sc = 710,5 psi.

**Tabla 62:** CÁLCULO MÉTODO PCA AV. JAIME PAZ (TIEMPO 2).

CARGA POR EJE	FS	REPETICIONES ESPERADAS	REP. PERMISIBLES	%FATIGA	REP. PERMISIBLES	% DE DAÑO
1	2	3	4	5	6	7
18	22	1737715,7	2000000	86,88	2500000	69,51

**Fuente:** Elaboración propia.

Las tablas para obtener el valor de esfuerzo equivalente y el factor de erosión se encuentran en el anexo 21 y 22. Las gráficas de cálculo para las repeticiones permisibles se encuentran en el anexo 29.

Esfuerzo equivalente = 285,88.

Factor de relación de esfuerzo = 0,4.

Factor de erosión = 2,95.

Porcentaje por fatiga = 86,88% < 100%

Porcentaje por erosión = 69,51% < 100%

**Espesor de losa = 7,2 plg.**

**Espesor de losa = 19 cm.**

c) Tiempo 3

Carga por eje = 18 kips.

Factor de seguridad = 1,2

Repeticiones esperadas = 2481788,7 ( eje simple )

K = 166,05 pci.

Sc = 710,5 psi.

**Tabla 63:** CÁLCULO MÉTODO PCA AV. JAIME PAZ ( TIEMPO 3).

CARGA POR EJE	FS	REPETICIONES ESPERADAS	REP. PERMISIBLES	%FATIGA	REP. PERMISIBLES	% DE DAÑO
1	2	3	4	5	6	7
18	22	2481788,1	3000000	82,7262701	3000000	82,73

**Fuente:** Elaboración propia.

Las tablas para obtener el valor de esfuerzo equivalente y el factor de erosión se encuentran en el anexo 21 y 22. Las gráficas de cálculo para las repeticiones permisibles se encuentran en el anexo 30.

Esfuerzo equivalente = 280,42.

Factor de relación de esfuerzo = 0,39.

Factor de erosión = 2,93.

Porcentaje por fatiga = 82,73% < 100%

Porcentaje por erosión = 82,73% < 100%

**Espesor de losa = 7,3 plg.**

**Espesor de losa = 19 cm.**

#### 4.5.2.3.INGRESO TERMINAL NUEVA.

Utilizando el procedimiento indicado en el anterior punto realizamos las operaciones necesarias para obtener el diseño adecuado.

**Tabla 64:** DATOS DE ENTRADA MÉTODO PCA INGRESO TERMINAL.

PARÁMETROS DE DISEÑO	TRAMO
	NUEVA TERMINAL
W18 (Tiempo 1)	22188870,82
W18 (Tiempo 2)	21400597,52
W18 (Tiempo 3)	825115,087
k (Pci)	180,81
S'c (Psi)	718,46
FS	1,2

**Fuente:** Elaboración propia.

a) Tiempo 1

Carga por eje = 18 kips.

Factor de seguridad = 1,2

Repeticiones esperadas = 22188870,8 ( eje simple )

K = 180,81 pci.

Sc = 718,46 psi.

**Tabla 65:** CÁLCULO MÉTODO PCA INGRESO TERMINAL (TIEMPO 1).

CARGA POR EJE (kips)	FS	REP. ESPERADAS	REP. PERMISIBLES	%FATIGA	REP. PERMISIBLES	% DE DAÑO
1	2	3	4	5	6	7
18	22	22188870,8	ILIMITADO	0	23000000	96,47

**Fuente:** Elaboración propia.

Las tablas para obtener el valor de esfuerzo equivalente y el factor de erosión se encuentran en el anexo 21 y 22. Las gráficas de cálculo para las repeticiones permisibles se encuentran en el anexo 31.

Esfuerzo equivalente = 215,3.

Factor de relación de esfuerzo = 0,299.

Factor de erosión = 2,68.

Porcentaje por fatiga = 0% < 100%

Porcentaje por erosión = 96,47% < 100%

**Espesor de losa = 8,9 plg.**

**Espesor de losa = 23 cm.**

b) Tiempo 2

Carga por eje = 18 kips.

Factor de seguridad = 1,2

Repeticiones esperadas = 21400597,5 ( eje simple )

K = 180,81 pci.

Sc = 718,46 psi.

**Tabla 66:** CÁLCULO MÉTODO PCA INGRESO TERMINAL (TIEMPO 2).

CARGA POR EJE	FS	REPETICIONES ESPERADAS	REP. PERMISIBLES	%FATIGA	REP. PERMISIBLES	% DE DAÑO
1	2	3	4	5	6	7
18	22	21400597,5	ILIMITADO	0	23000000	93,05

**Fuente:** Elaboración propia.

Las tablas para obtener el valor de esfuerzo equivalente y el factor de erosión se encuentran en el anexo 21 y 22. Las gráficas de cálculo para las repeticiones permisibles se encuentran en el anexo 31.

Esfuerzo equivalente = 215,3.

Factor de relación de esfuerzo = 0,299.

Factor de erosión = 2,68.

Porcentaje por fatiga = 0% < 100%

Porcentaje por erosión = 93,05% < 100%

**Espesor de losa = 8,9 plg.**

**Espesor de losa = 23 cm.**

c) Tiempo 3

Carga por eje = 18 kips.

Factor de seguridad = 1,2

Repeticiones esperadas = 825115 ( eje simple )

K = 180,81 pci.

Sc = 718,46 psi.

**Tabla 67:** CÁLCULO MÉTODO PCA INGRESO TERMINAL (TIEMPO 3).

CARGA POR EJE	FS	REPETICIONES ESPERADAS	REP. PERMISIBLES	%FATIGA	REP. PERMISIBLES	% DE DAÑO
1	2	3	4	5	6	7
18	22	825115	1000000	82,5115	1800000	45,84

**Fuente:** Elaboración propia.

Las tablas para obtener el valor de esfuerzo equivalente y el factor de erosión se encuentran en el anexo 21 y 22. Las gráficas de cálculo para las repeticiones permisibles se encuentran en el anexo 32.

Esfuerzo equivalente = 301,24.

Factor de relación de esfuerzo = 0,42.

Factor de erosión = 2,99.

Porcentaje por fatiga = 82,51% < 100%

Porcentaje por erosión = 45,84% < 100%

**Espesor de losa = 7 plg.**

**Espesor de losa = 18 cm.**

#### **4.5.3. MÉTODO WESTERGARD**

Este método tiene un procedimiento de cálculo simple mediante el uso de dos ecuaciones 6 y 7 las cuales están sujetas a las variables de peso, esfuerzo provocado en la losa por la carga, módulo de elasticidad, módulo de reacción de la subrasante.

##### **4.5.3.1.AVENIDA CIRCUNVALACIÓN.**

Este método no tiene la variable de tráfico es por esto que solo se realizara un diseño para cada tramo.

$P = 80 \text{ KN} = 8155 \text{ kg}$

$$E_c = 4426205,45 \text{ Psi} = 311196,23 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$K = 184,5 \text{ Pci} = 5,1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$$

$$S = 45 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\mu = 0,15$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{311196,23 * h^3}{12 * (1 - 0,15^2) * 5,1}}$$

La variable (a) se la estima mediante ábaco se encuentra en el anexo 33 donde entramos con la carga que se aplica en la losa.

$$a = 25 \text{ cm.}$$

$$45 = \frac{3 * 8155}{h^2} * \left[ 1 - \left( \frac{25 * \sqrt{2}}{\sqrt[4]{\frac{311196,23 * h^3}{12 * (1 - 0,15^2) * 5,1}}} \right)^{0.6} \right]$$

$$\mathbf{h = 15,53 \text{ cm.}}$$

$$\mathbf{h = 16 \text{ cm.}}$$

#### 4.5.3.2.AVENIDA JAIME PAZ ZAMORA.

Este método no tiene la variable de tráfico es por esto que solo se realizara un diseño para cada tramo.

$$P = 80 \text{ KN} = 8155 \text{ kg}$$

$$E_c = 4049668,83 \text{ Psi} = 284722,82 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$K = 166,05 \text{ Pci} = 4,6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$$

$$S = 45 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\mu = 0,15$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{284722,82 * h^3}{12 * (1 - 0,15^2) * 4,6}}$$

La variable (a) se la estima mediante ábaco se encuentra en el anexo 33 donde entramos con la carga que se aplica en la losa.

a = 25 cm.

$$45 = \frac{3 * 8155}{h^2} * \left[ 1 - \left( \frac{25 * \sqrt{2}}{\sqrt[4]{\frac{284722,82 * h^3}{12 * (1 - 0,15^2) * 4,6}}} \right)^{0,6} \right]$$

**h = 15,56 cm.**

**h = 16 cm.**

#### 4.5.3.3.INGRESO TERMINAL NUEVA.

Este método no tiene la variable de tráfico es por esto que solo se realizara un diseño para cada tramo.

$$P = 80 \text{ KN} = 8155 \text{ kg}$$

$$E_c = 4093004,57 \text{ Psi} = 287769,65 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$K = 180,81 \text{ Pci} = 5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$$

$$S = 45 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\mu = 0,15$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{287769,65 * h^3}{12 * (1 - 0,15^2) * 5}}$$

La variable (a) se la estima mediante ábaco se encuentra en el anexo 33 donde entramos con la carga que se aplica en la losa. a = 25 cm.

$$45 = \frac{3 * 8155}{h^2} * \left[ 1 - \left( \frac{25 * \sqrt{2}}{\sqrt[4]{\frac{287769,65 * h^3}{12 * (1 - 0,15^2) * 5}}} \right)^{0.6} \right]$$

$$h = 15,4 \text{ cm.} = 16\text{cm.}$$

#### 4.6. RESULTADOS.

**Tabla 68:** DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO CON PCA-CÁLCULO.

DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO CON PCA-cálculo (cm)			
	Av. Circunvalación.	Av. Jaime Paz Z.	Ingreso Terminal.
Tiempo 1	23	20	23
Tiempo 2	23	19	23
Tiempo 3	21	19	18
Espesor medido en campo	21	22	25

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 69:** DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO MÉTODO AASHTO93.

DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO MÉTODO AASHTO-93 (cm)			
	Av. Circunvalación	Av. Jaime Paz Z.	Ingreso Terminal.
Tiempo 1	25	19	25
Tiempo 2	23	16	24
Tiempo 3	20	17	5

Espesor medido en campo	21	22	25
-------------------------	----	----	----

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 70:** DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO MÉTODO PCA.

DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO MÉTODO PCA (cm)			
	Av. Circunvalación.	Av. Jaime Paz Z.	Ingreso Terminal.
Tiempo 1	24	20	23
Tiempo 2	23	19	23
Tiempo 3	21	19	18
Espesor medido en campo	21	22	25

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 71:** DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO MÉTODO WESTERGARD.

DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO MÉTODO WESTERGARD (cm)			
	Av. Circunvalación.	Av. Jaime Paz Z.	Ingreso Terminal.
Espesor de diseño	16	16	16
Espesor medido en campo	21	22	25

**Fuente:** Elaboración propia.

## 4.7. ANÁLISIS.

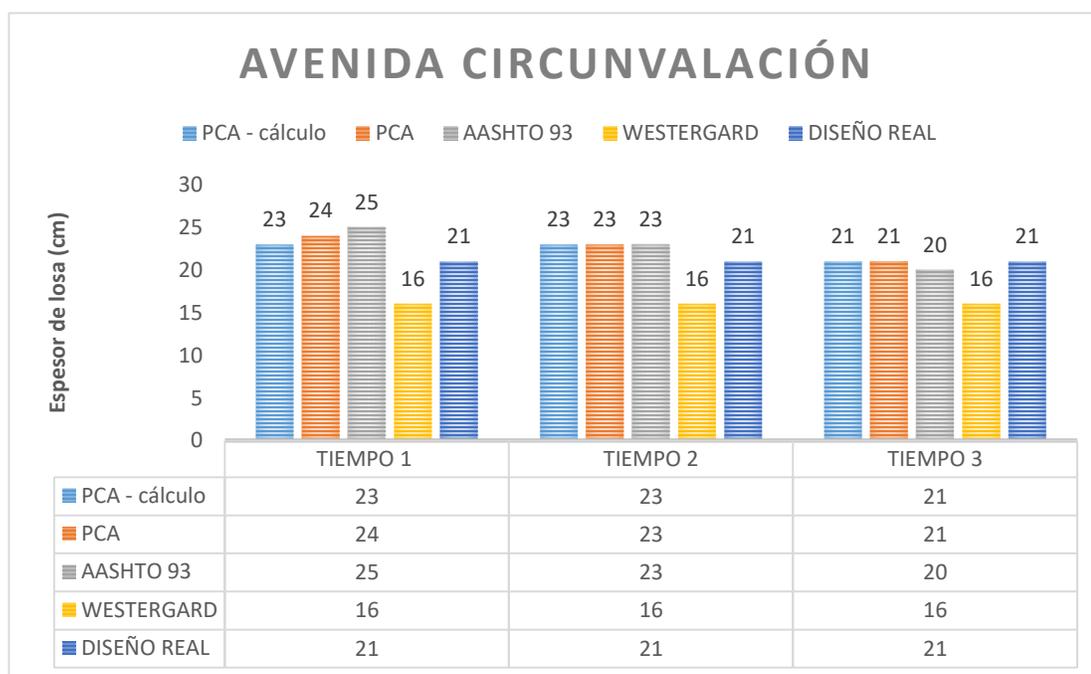
El análisis comparativo del software con los métodos tradicionales se aplica en la obtención de resultados de espesor de losa, el procedimiento de cálculo y los parámetros de diseño que son los valores de entrada; También se realiza un análisis del funcionamiento de los métodos al momento de asumir un grado de importancia de una variable a otra. En los siguientes puntos se realiza todos los análisis mencionados:

### 4.7.1. ANÁLISIS DE ESPESORES.

En las siguientes graficas podemos observar los resultados de los diseños según su método y tiempo, comparando con los diseños reales es decir los espesores de losa con los que se encuentran dichos tramos. Se muestra el espesor de diseño donde los cuatro primeros de cada tiempo son los métodos que compararemos y siendo el último de estos el diseño real con el que comparamos y verificamos nuestros parámetros de diseño, si el espesor está bien diseñado o no.

#### 4.7.1.1. AVENIDA CIRCUNVALACIÓN.

**Ilustración 45:** COMPARACIÓN DE ESPESORES AV. CIRCUNVALACIÓN.



**Fuente:** Elaboración propia.

**a) Tiempo 1: Periodo de diseño 35 años.**

- Como podemos ver el diseño real en comparación con los diseños obtenidos con los diferentes métodos esta sub dimensionado, podemos decir que esto es producto del incremento en la circulación de vehículos pesados en el tramo en los últimos años debido a que está prohibido la circulación de flotas y camiones de alto tonelaje por las calles y avenidas de la ciudad, este tramo se ha vuelto una calle bastante concurrida por los vehículos particulares que podría no haber sido previsto en el diseño.
- La diferencia entre el software PCA-cálculo con el método PCA es de un centímetro esto debido a los redondeos al momento de las iteraciones en el análisis de erosión muestra una diferencia de 90,46% a 85,47% respectivamente, podemos ver esa diferencia por el centímetro que los separa.
- La diferencia entre los métodos AASHTO 93, PCA, WESTERGARD y el software PCA-cálculo es debido a la variación al momento de asumir mayor o menor influencia en los parámetros de diseño esto es apreciable en el apartado 4.7.6.
- Las fallas en el pavimento ya son apreciables (anexo 34) pudiendo decir que el nuestro diseño podría ser el adecuado para este tramo.

**b) Tiempo 2: Periodo de diseño 17 años.**

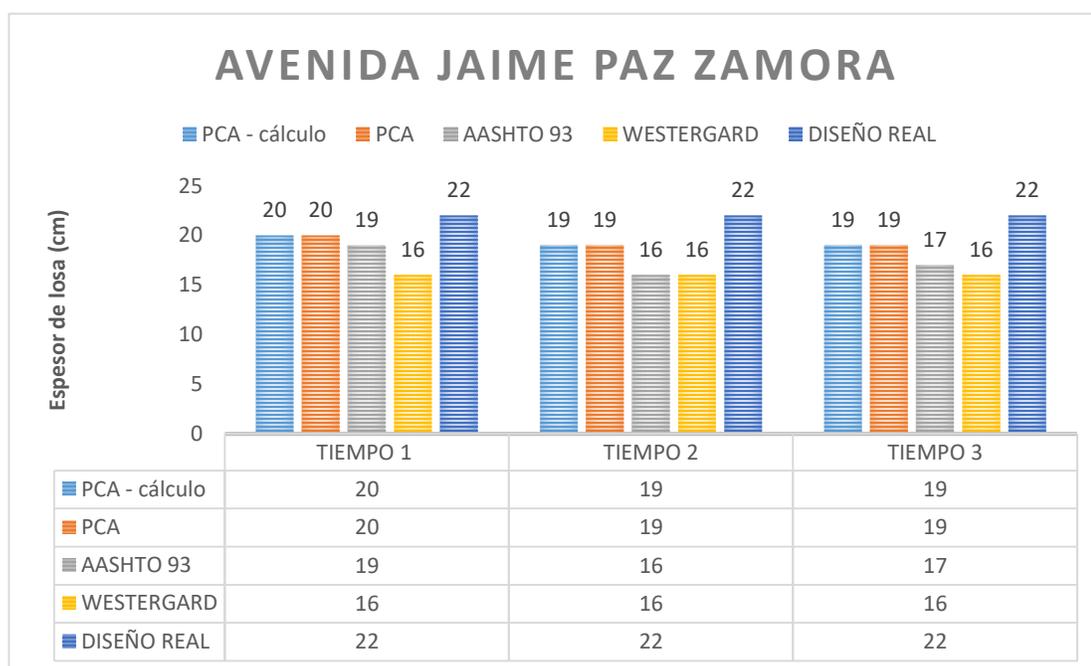
- En este diseño podemos ver que el pavimento sigue sub dimensionado, en este tiempo trabajamos con un periodo de diseño de 17 años que es lo que le queda de vida útil al proyecto, como se indicó en el tiempo 1 tiene el mismo problema de tráfico.
- En este caso podemos ver que los tres métodos de cálculo PCA-cálculo, PCA y AASHTO 93 son iguales sin embargo el diseño real sigue sub dimensionado.
- Viendo las fallas que presenta el pavimento (anexo 34) y para este periodo de análisis se requerirá mantenimiento por el estado en el que se encuentra en la actualidad ya este periodo estudia el dimensionamiento necesario para culminar su vida útil.

**c) Tiempo 3: Periodo de diseño 18 años.**

- En este tiempo el diseño de los métodos con el software y los otros métodos en comparación con el diseño real son iguales o similares, esto nos quiere decir que el diseño es bueno y que según los datos con los que contamos el periodo de diseño de este tiempo que es el transcurrido desde su ejecución hasta el 2016 debió ser la vida útil del diseño real, podemos decir esto también por el estado del pavimento en el que se encuentra actualmente (anexo 34) que coincide con el diseño de este periodo de diseño.
- No hay diferencia entre el software PCA-cálculo con el método PCA, en el análisis de erosión de 94,56% a 95,36% respectivamente se ve la diferencia por los decimales al momento de asumir el espesor de losa, así pudiendo verificar el software.

**4.7.1.2. AVENIDA JAIME PAZ ZAMORA.**

**Ilustración 46: COMPARACIÓN DE ESPESORES AV. JAIME PAZ.**



**Fuente:** Elaboración propia.

**a) Tiempo 1: Periodo de diseño 35 años.**

- El diseño con el software y los métodos son menores al diseño real, esto puede ser afectado por el tráfico ya que al momento de su diseño el año 1990 el tramo era utilizado como una calle en donde transitaba cualquier tipo de vehículo pero en este tiempo los vehículos pesados ya no transitan por este punto esto nos quiere decir que este tramo puede durar más de lo esperado sin necesidad de mantenimiento, dicho esto, el tramo en la actualidad está en muy mal estado (anexo 35) contradiciendo los resultados de diseño, esto puede tener varios motivos uno de los cuales puede ser el daño ocasionado anteriormente por el tráfico, dato que tuvo un cambio considerable en el transcurso del tiempo.
- La diferencia entre el software PCA-cálculo con el método PCA es nula comprobando en el análisis de erosión de 94,32% a 86,94% respectivamente, esta diferencia es por los decimales al momento de asumir el espesor de losa, así pudiendo verificar el software.

**b) Tiempo 2: Periodo de diseño 9 años.**

- En este diseño podemos apreciar que es todavía más bajo que el primer tiempo esto debido al periodo de diseño que utilizamos, en este tiempo es de 9 años que vendría a ser el tiempo que le quedaría de vida útil, estos valores nos muestra que el diseño real es mayor a lo necesario es decir que el pavimento trabajara en perfectas condiciones hasta finalizar su vida útil y aún más tiempo. Dicho en el inciso a) el pavimento ya se encuentra muy dañado (anexo 35) por tal motivo es contradictorio el análisis de los resultados con lo mostrado en la realidad.
- En este caso seguimos viendo la similitud que presenta el PCA-cálculo con el método PCA, es una forma de verificar el funcionamiento del software.
- La variación del método AASHTO 93 en comparación con el método PCA es debido a la importancia que cada método presenta en función del tráfico se lo ve en el apartado 4.7.6.

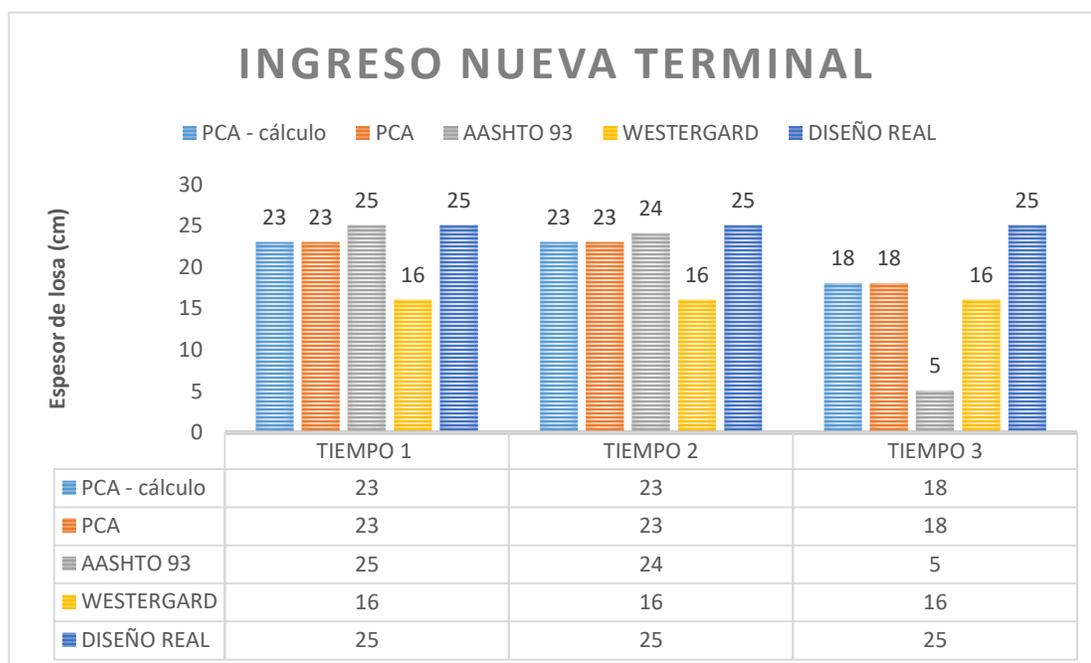
- El método WESTERGARD no tiene como variable el tráfico es por este motivo que no tiene variación en ninguno de los casos pero en este podemos ver que está más cerca de los otros resultados.

**c) Tiempo 3: Periodo de diseño 26 años.**

- En este tiempo no hay mucha variación en los resultados, aunque su periodo de diseño es de 26 años no implico mucho ya que el trafico estimado para el año 1990 era muy pequeño con poco o ningún vehículo pesado.

#### 4.7.1.3. INGRESO NUEVA TERMINAL.

**Ilustración 47: COMPARACIÓN DE ESPESORES INGRESO TERMINAL.**



**Fuente:** Elaboración propia.

**a) Tiempo 1: Periodo de diseño 30 años.**

- Este tramo fue diseñado con un aforo en la terminal vieja el año 2016 antes de su inauguración el año 2017 esto debido que el estudio realizado en la terminal nueva no cuenta con un volumen de tráfico considerable, sin embargo utilizando este volumen de tráfico que es mayor seguimos obteniendo resultados menores al diseño real, esto quiere decir que este tramo esta sobre

dimensionado. El tramo es prácticamente nuevo se puede apreciar que no tiene ninguna falla por el momento (anexo 36) y por los resultados obtenidos esto debería mantenerse en buenas condiciones toda su vida útil.

- Como en los otros casos el método WESTERGARD no presenta variación.
- El método AASHTO 93 es el que nos dio un resultado igual al real por la variación en la toma de los datos.

**b) Tiempo 2: Periodo de diseño 28 años**

- Este tiempo no presenta mucha variación debido a que su periodo de diseño es solo dos años menos que la vida útil.

**c) Tiempo 3: Periodo de diseño 2 años.**

- Este diseño es mucho más bajo ya que el periodo de diseño es de dos años que transcurrieron desde su ejecución hasta la actualidad.
- Aquí podemos apreciar la variación al utilizar uno u otro método.
- El método AASHTO nos muestra un valor muy por debajo de los otros métodos, al momento de realizar la estadística este valor no se lo incluirá como un resultado valido.

#### **4.7.2. ANÁLISIS DE VIDA ÚTIL DEL PAVIMENTO.**

Realizamos una estimación con el software PCA-cálculo del tiempo de vida útil que debería tener cada tramo según los datos con los que contamos.

**a) AVENIDA CIRCUNVALACIÓN.**

El espesor del pavimento en este tramo es de 21cm. para alcanzar este espesor requiere de **23 años de vida útil** que nos da un número ESALs de 10576417 lo que nos deja **4 años de vida útil desde el 2017 hasta el 2021** si las condiciones continúan como están ahora cabe resaltar que años atrás había menor cantidad de tráfico que hicieron menos daño quiere decir que el pavimento puede durar más del 2021, esta variación es debido al incremento de tráfico que podría no haber sido previsto en este tramo, otro factor que influye es el índice de crecimiento depende, entre otros factores, del desarrollo económico – social y de la capacidad de la vía. Es normal que el tránsito vehicular

aumente con el paso del tiempo hasta que llega a un punto tal de saturación en que se mantiene prácticamente sin crecer. La tasa varía de acuerdo a los tipos de vehículos, los cuales pueden crecer más en unos casos que en otros. A medida que una vía se va congestionando de tránsito, su crecimiento se hace más lento; este efecto debe tomarse en cuenta estimando una tasa de crecimiento equivalente, para considerar las variaciones en el crecimiento durante la vida útil.

b) AVENIDA JAIME PAZ ZAMORA.

El espesor del pavimento en este tramo es de 22cm. para alcanzar este espesor requiere de **60 años de vida útil** que nos da un número ESALs de 17640737, lo que nos deja **33 años de vida útil desde el 2017 hasta el 2040** según las condiciones actuales, como se había mencionado el estado de este pavimento es malo lo que quiere decir que la durabilidad de este pavimento no alcanzara la vida útil calculada debido al daño con la que se encuentra.

c) INGRESO NUEVA TERMINAL.

El espesor del pavimento en este tramo es de 25cm. para alcanzar este espesor requiere de **60 años de vida útil** que nos da un número ESALs de **129657490**, lo que nos deja **57 años de vida útil desde el 2017 hasta el 2074**.

#### 4.7.3. ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTO.

**Tabla 72: ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTO.**

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>AASHTO 93</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es el resultado de la utilización de una sola ecuación disminuyendo el margen de error.</li> <li>• La mayor parte de sus variables están en tablas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene muchas variables.</li> <li>• La variable de tráfico tiene mucha influencia en el resultado.</li> <li>• El resultado obtenido solo se puede cambiar al asumir cambios en</li> </ul>

		alguna variable de diseño.
<b>PCA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El resultado es una estimación del comportamiento del pavimento, dándonos la oportunidad de asumir el valor según el criterio de cada uno.</li> <li>• El resultado varía según dos parámetros que nos indican si el diseño es adecuado o no.</li> <li>• El factor de seguridad mayor el número de repeticiones de tráfico dándonos un margen de error.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El procedimiento de cálculo es manual mediante estimaciones en una gráfica aumentando el margen de error.</li> <li>• Se debe iterar muchas veces los valores en las tablas al probar un espesor diferente volviendo un procedimiento largo y tedioso.</li> </ul>
<b>WESTERGARD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene pocas variables.</li> <li>• Es el resultado del uso de dos ecuaciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No cuenta con la variable de tráfico.</li> <li>• Todos los parámetros de diseño no se pueden hacer variar para conseguir otra alternativa de diseño.</li> <li>• Utiliza ábacos para la estimación de una</li> </ul>

		variable limitando el carga estimada.
<b>PCA-cálculo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El programa realiza todas las iteraciones necesarias al asumir un espesor diferente cada vez que se quiere probar con una alternativa diferente.</li> <li>• No es necesario calcular el número ESALs, solo requiere del peso del vehículo, tipo de eje y numero de repeticiones para ingresarlo como dato.</li> <li>• No es necesario estimar el valor del módulo de reacción combinado subransante – subbase, solo requiere el CBR o el módulo de reacción de la subrasante y la altura de la subbase.</li> <li>• Nos permite ingresar los datos en el sistema internacional y en el sistema inglés.</li> <li>• Nos calcula una opción de barras de anclaje y pasadores.</li> </ul>	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El resultado es una estimación del comportamiento del pavimento, dándonos la oportunidad de asumir el valor según el criterio de cada uno.</li> <li>• El resultado varía según dos parámetros que nos indican si el diseño es adecuado o no.</li> <li>• El factor de seguridad mayor el número de repeticiones de tráfico dándonos un margen de error.</li> </ul>	
--	--	--

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.7.4. ANÁLISIS DE VALORES DE ENTRADA.

Cada método tiene diferentes variables que se muestran a continuación:

**Tabla 73:** ANÁLISIS DE VALORES DE ENTRADA.

MÉTODO	VALORES DE ENTRADA
AASHTO 93	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número equivalente de ejes de 80KN (ESALs) (W18)</li> <li>• Serviciabilidad inicial (Po)</li> <li>• Serviciabilidad final (Pt)</li> <li>• Módulo de rotura del concreto (<math>S'c</math>)</li> <li>• Módulo de elasticidad (<math>E_c</math>)</li> <li>• Módulo de reacción de la subrasante (K)</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel de confianza (R)</li> <li>• Desviación estándar (<math>S_o</math>)</li> <li>• Coeficiente de transferencia de carga (J)</li> <li>• Coeficiente de drenaje (<math>C_d</math>)</li> <li>• Área bajo la curva de distribución (ZR)</li> </ul>
PCA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número equivalente de ejes de 80KN (ESALs) (W18)</li> <li>• Módulo de rotura del concreto (<math>S'c</math>)</li> <li>• Módulo de reacción de la subrasante (K)</li> <li>• Factor de seguridad (FS)</li> </ul>
WESTERGARD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfuerzo provocado en la losa por la carga (S)</li> <li>• Carga (P)</li> <li>• Radio del círculo de área equivalente al área cargada (a)</li> <li>• Radio de rigidez relativa entre losa y subrasante (<math>\iota</math>)</li> <li>• Módulo de elasticidad (<math>E_c</math>)</li> <li>• Coeficiente de Poisson para el concreto (<math>\mu</math>)</li> <li>• Módulo de reacción de la subrasante (K)</li> </ul>
PCA-cálculo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número equivalente de ejes de 80KN (ESALs) (W18)</li> <li>• Módulo de rotura del concreto (<math>S'c</math>)</li> <li>• Módulo de reacción de la subrasante (K)</li> <li>• Factor de seguridad (FS)</li> </ul>

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla anterior vemos la diferencia de valores de entrada de un método a otro, el método AASHTO 93 es el método que contiene más datos de entrada aunque la mayor parte de datos están estandarizado, este método tiene limitaciones al momento de calcular el espesor de la losa como podemos ver en el apartado 4.7.6. El método Westergard tiene parámetros diferentes a los métodos PCA y AASHTO 93, con una

sola variable que se repite en todos los casos que es el módulo de reacción de la subrasante, es por esto la diferencia tan amplia en los resultados en comparación con los otros métodos, este es un método antiguo que es poco usado en la actualidad.

El método más práctico es el método PCA por la cantidad de valores de entrada y sus resultados confiables, aunque el proceso de cálculo es tedioso con tan pocos datos contamos con el software PCA-cálculo que utiliza este método quitando todo el proceso de cálculo aumentando la eficacia del diseño. Este método es el método con menos variables de entrada siendo una de ellas estandarizada en tabla solo nos quedaría por calcular tres variables.

El proceso de cálculo de la mayoría de los valores de entrada es sencilla y no necesita de mucho estudio pudiendo decir que la calidad es buena, en cambio ciertos valores como el número ESALs y el módulo de reacción de la subrasante son parámetros que requieren de un estudio más exhaustivo dejando un mayor margen de error en el proceso de cálculo.

#### 4.7.5. ANÁLISIS DE DATOS.

Los valores recomendables por la norma AASHTO indican:

- a) Concreto hidráulico.

El espesor de la losa de hormigón se recomienda valores de 12 a 30cm los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango de la norma AASHTO.

**Tabla 74: ESPESOR RECOMENDABLE.**

DATO	TRAMOS			RECOMENDABLE
	CIRCUNVALACIÓN	JAIME PAZ	TERMINAL	
ESPESOR DE LOSA	23cm	20cm	23cm	12cm – 30cm

**Fuente:** Elaboración propia.

## b) Capa sub base.

El espesor de la capa sub base se recomienda valores de 10 a 30cm los espesores usados en campo están dentro del rango con la única variable del ingreso a la nueva terminal, este dato no es malo porque se encuentra por encima lo que nos indica que tiene mejores condiciones de diseño.

**Tabla 75: CAPA SUB BASE RECOMENDABLE.**

DATO	TRAMOS			RECOMENDABLE
	CIRCUNVALACIÓN	JAIME PAZ	TERMINAL	
ESPESOR SUBBASE	25cm	30cm	35cm	10Cm – 30cm

**Fuente:** Elaboración propia.

## c) Índice de crecimiento.

La tasa de crecimiento anual depende, entre otros factores, del desarrollo económico – social y de la capacidad de la vía. Es normal que el tránsito vehicular aumente con el paso del tiempo hasta que llega a un punto tal de saturación en que se mantiene prácticamente sin crecer. La tasa varía de acuerdo a los tipos de vehículos, los cuales pueden crecer más en unos casos que en otros. A medida que una vía se va congestionando de tránsito, su crecimiento se hace más lento; este efecto debe tomarse en cuenta estimando una tasa de crecimiento equivalente, para considerar las variaciones en el crecimiento durante la vida útil. Es importante investigar adecuadamente la tasa de crecimiento para cada caso en particular.

**Tabla 76:** VALORES FRECUENTES DE ÍNDICE DE CRECIMIENTO.

Caso	Tasa de crecimiento
Crecimiento normal	1% a 3%
Vías completamente saturadas	0% a 1%
Con tránsito inducido*	4% a 5%
Alto crecimiento*	Mayor al 5%
*Solamente durante 3 a 5 años	

**Fuente:** A6 diseño de pavimentos rígidos.

Según el índice de crecimiento obtenido en el apartado 4.3.2. Los casos de crecimiento son los siguientes:

**Tabla 77:** CASO DE ÍNDICE DE CRECIMIENTO.

TIPO DE VEHÍCULO	ÍNDICE DE CRECIMIENTO
Automóviles y vagonetas	Alto crecimiento
Camionetas (2tn)	Alto crecimiento
Microbuses (hasta 15 pasajeros)	Alto crecimiento
Microbuses (hasta 21 pasajeros;2 ejes)	Crecimiento normal
Buses medianos (hasta 35pjs;2ejes)	Crecimiento normal
Buses grandes (más de 35pjs;3ejes)	Con transito inducido
Camiones medianos (de 2,5 a 10tn;2ejes)	Alto crecimiento
Camiones grandes (más de 10tn; 2ejes)	Alto crecimiento

Camiones grandes (más de 10tn;3ejes)	Alto crecimiento
Camiones semirremolque	Alto crecimiento
Camiones remolque	Alto crecimiento
Otros vehículos	Alto crecimiento

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se ve en la tabla 76 el índice de crecimiento se mantiene casi constante durante 3 a 5 años lo que vuelve esta variable un factor con un amplio margen de error.

d) Serviciabilidad.

La serviciabilidad inicial para todos los casos es de 4,5 lo que nos indica un pavimento entre excelente y muy bueno hasta cumplir su vida útil con una serviciabilidad final de 2,5 que nos indica un pavimento regular.

**Tabla 78:** ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD.

Índice de servicio	Calificación
5	Excelente
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
0	Intransitable

**Fuente:** A6 diseño de pavimentos rígidos.

**Tabla 79:** CLASIFICACIÓN DE SERVICIABILIDAD

SERVICIABILIDAD INICIAL	4,5	Muy bueno
SERVICIABILIDAD FINAL	2,5	Regular

**Fuente:** Elaboración propia.

e) Módulo de rotura.

Según la norma AASHTO los valores recomendables del módulo de rotura se encuentran en un rango de 400 a 700psi, también nos ofrece valores según el tipo de pavimento.

**Tabla 80:** MÓDULO DE RUPTURA RECOMENDADO.

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:** Análisis comparativo de métodos de diseño y construcción de pavimentos de concreto hidráulico según normas aplicadas en México, reino unido y España.<sup>13</sup>

**Tabla 81:** RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO RECOMENDABLE.

DATO	TRAMOS			RECOMENDABLE
	CIRCUNVALACIÓN	JAIME PAZ	TERMINAL	
MR (psi)	776,79psi	710,5psi	718,46psi	400 a 700psi

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se puede ver en la tabla 80 los valores recomendables según el tipo de pavimento están por debajo de los datos con los que contamos lo que indica que nuestra muestra de hormigón tomada en campo es buena ya que se encuentra por encima de lo recomendable.

f) Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad está íntimamente relacionado con el módulo de ruptura lo que quiere decir que si estos valores son buenos por encima de lo recomendable entonces el módulo de elasticidad cuenta con las mismas características de calidad.

g) Módulo de reacción de la sub rasante.

Este módulo se encuentra relacionado con el CBR (California Bearing Ratio) es por esto que la norma AASHTO no cuenta con normativa para el módulo de reacción de la subrasante sino de su CBR permisible para un tipo de suelo.

**Tabla 82:** MATERIALES PARA LA CONFORMACIÓN DE LA SUBRASANTE.

Materiales para la formación de la subrasante

Símbolo	Definición del material	Artículo del PG-3	Prescripciones complementarias
IN	Suelo inadecuado o marginal	330	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su empleo sólo será posible si se estabiliza con cal o con cemento para conseguir S-EST1 o S-EST2.</li> </ul>
0	Suelo tolerable	330	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CBR \geq 3</math> (*).</li> <li>• Contenido en materia orgánica &lt; 1%.</li> <li>• Contenido en sulfatos solubles (SO<sub>3</sub>) &lt; 1%.</li> <li>• Hinchamiento libre &lt; 1%.</li> </ul>
1	Suelo adecuado	330	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CBR \geq 5</math> (*) (**).</li> </ul>
2	Suelo seleccionado	330	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CBR \geq 10</math> (*) (**).</li> </ul>
3	Suelo seleccionado	330	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CBR \geq 20</math> (*).</li> </ul>
S-EST1 S-EST2 S-EST3	Suelo estabilizado in-situ con cemento o cal	512	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espesor mínimo: 25 cm.</li> <li>• Espesor máximo: 30 cm.</li> </ul>

**Fuente:** Análisis comparativo de métodos de diseño y construcción de pavimentos de concreto hidráulico según normas aplicadas en México, reino unido y España.

**Tabla 83:** DEFINICIÓN DEL MATERIAL SUB RASANTE.

DATO	TRAMOS			DEFINICIÓN DEL MATERIAL
	CIRCUNVALACIÓN	JAIME PAZ	TERMINAL	
CBR (%)	4,2	3	3	SUELO TOLERABLE
K (pci)	184,5	166,05	180,81	

**Fuente:** Elaboración propia.

Lo que nos indica la tabla 82 es que el suelo con el que contamos es un suelo tolerable ya que son iguales a 3% o mayores en este caso 4,2%, el tipo de suelo no es el ideal pero contamos con capas sub bases de un tamaño considerable lo que aumenta el módulo de reacción de la subrasante aumentando su calidad.

**Tabla 84:** CORRELACIÓN CON C.B.R.

Tipo de Suelo	SUCS	Densidad Seca lb/ft <sup>3</sup>	CRB %	K * pci
<b>Suelos Granulares</b>				
Grava	GW, GP	125 a 140	60 a 80	300 a 450
		120 a 130	35 a 60	300 a 400
Arena Gruesa	SW	110 a 130	20 a 40	200 a 400
Arena Fina	SP	105 a 120	15 a 25	150 a 300
<b>Suelos de Material Granular con Alto Contenido de Finos</b>				
Grava - Limosa Grava - Areno - Limosa	GM	130 a 145	40 a 80	300 a 500
Arena - Limosa Arena - Limo - Gravosa	SM	120 a 135	20 a 40	300 a 400
Grava - Arcillosa Grava - Areno - Arcillosa	GC	120 a 140	20 a 40	200 a 450
Arena - Arcillosa	SC	105 a 130	10 a 20	150 a 350
<b>Suelos de Material Fino **</b>				
Limo	ML, OL	90 a 105	4 a 8	25 a 165
Limo - Arenoso Limo - Gravoso		100 a 125	5 a 15	40 a 220
Limo Mal Graduado	MH	80 a 100	4 a 8	25 a 190
Arcilla Plástica	CL	100 a 125	5 a 15	25 a 255
Arcilla Medianamente Plástica	CL, OL	95 a 125	4 a 15	25 a 215
Arcilla Altamente Plástica	CH, OH	80 a 110	3 a 5	40 a 220

**Fuente:** Análisis comparativo de métodos de diseño y construcción de pavimentos de concreto hidráulico según normas aplicadas en México, reino unido y España.

Según la tabla 84 y 85 tenemos en los tres tramos arcilla altamente plástica y suelos orgánicos de alta plasticidad (CH y OH).

**Tabla 85: TIPOLOGIA DE SUELOS (SUCS).**

SÍMBOLO	Características generales		
GW	GRAVAS (>50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos<5%)	Bien graduadas
GP			Pobremente graduadas
GM		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
GC			Componente arcilloso
SW	ARENAS (<50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos<5%)	Bien graduadas
SP			Pobremente graduadas
SM		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
SC			Componente arcilloso
ML	LIMOS	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad (LL>50)	
CL	ARCILLAS	Baja plasticidad (LL<50)	
CH		Alta plasticidad (LL>50)	
OL	SUELOS ORGÁNICOS	Baja plasticidad (LL<50)	
OH		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	TURBA	Suelos altamente orgánicos	

**Fuente:** [https://sirio.ua.es/proyectos/manual\\_%20carreteras/02010103.pdf](https://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf).

#### 4.7.6. ANÁLISIS DE MÉTODOS.

En este punto realizaremos un análisis del comportamiento de los métodos en función de sus variables, omitiendo el método PCA ya que es el mismo con el que trabaja el software.

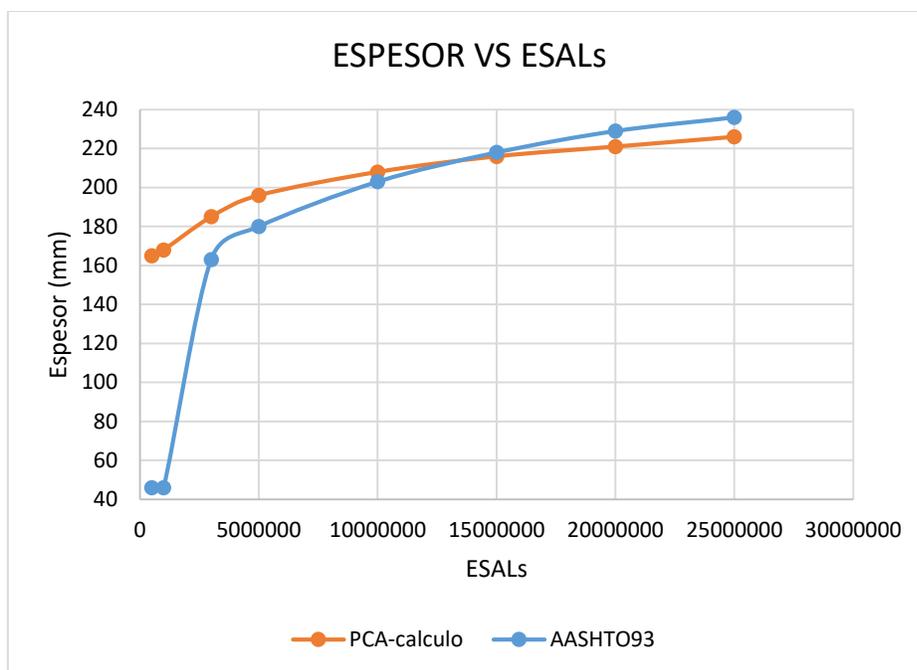
Utilizaremos los datos de la circunvalación tiempo 1 alterando las diferentes variables:

- Comparación del método AASHTO 93 con el software PCA-cálculo al cambiando la variable de tráfico (ESALs).

**Tabla 86:** VARIACIÓN EN EL N°ESAL's.

AASHTO93		PCA-calcu	
ESALs	Espesor	ESALs	Espesor
	mm		mm
500000	46	500000	165
1000000	46	1000000	168
3000000	163	3000000	185
5000000	180	5000000	196
10000000	203	10000000	208
15000000	218	15000000	216
20000000	229	20000000	221
25000000	236	25000000	226

**Fuente:** Elaboración propia.

**Ilustración 48:** COMPARACIÓN DE MÉTODOS VARIANDO N° ESAL'S

**Fuente:** Elaboración propia.

Se puede ver la diferencia que muestra el método AASHTO 93 con el PCA al momento de considerar la variable de tráfico, así mismo podemos comprobar el porqué del resultado del tramo “INGRESO NUEVA TERMINAL” en el tiempo 3.

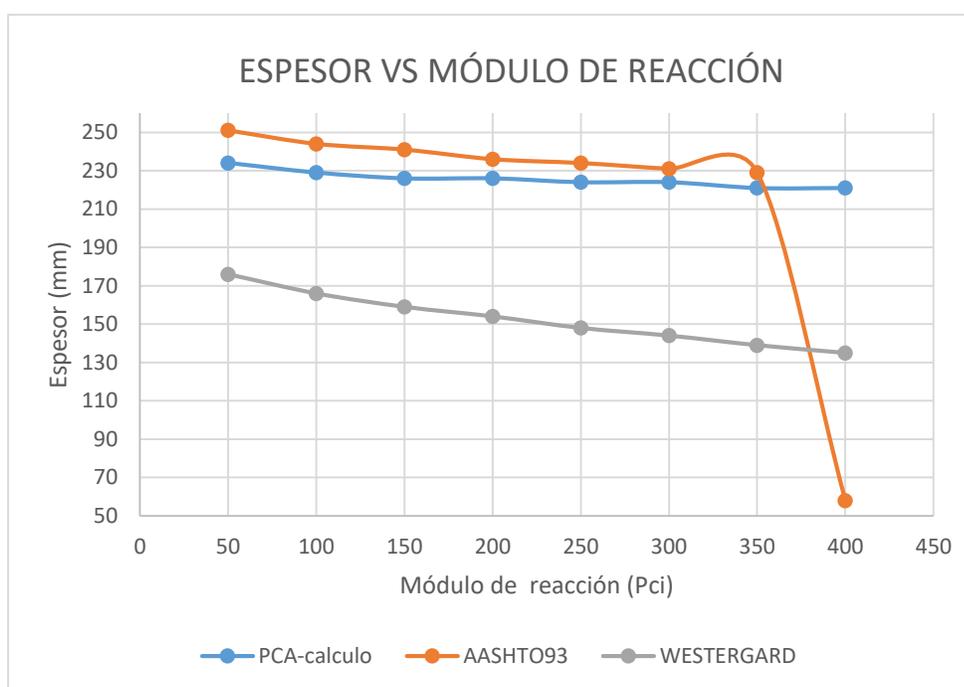
- b) Comparación del método AASHTO 93, WESTERGARD y PCA-cálculo cambiando el módulo de reacción de la subrasante (k).

**Tabla 87:** VARIACIÓN EN EL MÓDULO DE REACCIÓN.

AASHTO93		PCA-calculo		WESTERGARD	
k	Espesor	K	Espesor	K	Espesor
Pci	mm	Pci	mm	Pci	mm
50	251	50	234	50	176
100	244	100	229	100	166
150	241	150	226	150	159
200	236	200	226	200	154
250	234	250	224	250	148
300	231	300	224	300	144
350	229	350	221	350	139
400	58	400	221	400	135

**Fuente:** Elaboración propia.

**Ilustración 49:** COMPARACIÓN DE MÉTODOS VARIANDO K.



**Fuente:** Elaboración propia.

Podemos apreciar el comportamiento del módulo de reacción en el dimensionamiento de la losa, en los casos del PCA y WESTERGARD se ve una clara tendencia lo que no presenta el método AASHTO 93.

Al igual que en el anterior análisis se ve en el método AASHTO 93 un cambio brusco en su tendencia lo que podríamos tomarlo como una limitación del método.

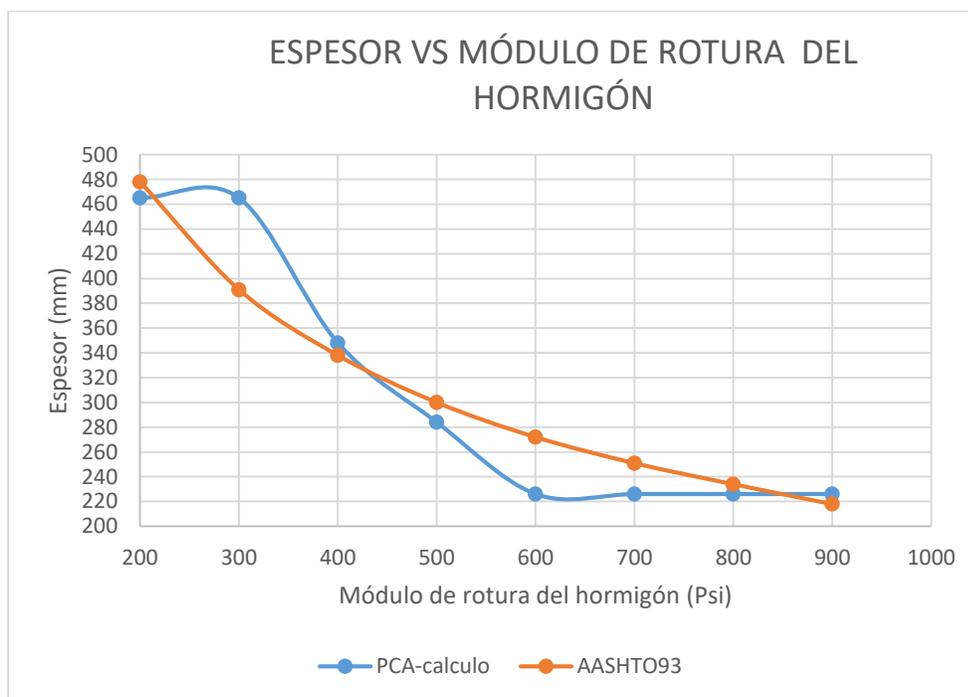
- c) Comparación del método AASHTO 93 y PCA-cálculo cambiando el módulo de rotura del hormigón ( $S'c$ ).

**Tabla 88:** VARIACIÓN EN EL MÓDULO ROTURA.

AASHTO93		PCA-cálculo	
$S'c$	Espesor	$S'c$	Espesor
Psi	mm	Psi	mm
200	478	200	465
300	391	300	465
400	338	400	348
500	300	500	284
600	272	600	226
700	251	700	226
800	234	800	226
900	218	900	226

**Fuente:** Elaboración propia.

**Ilustración 50:** COMPARACIÓN DE MÉTODOS VARIANDO MR.



**Fuente:** Elaboración propia.

Se observa una clara tendencia en el método AASHTO 93 a diferencia del método PCA en el que vemos sus limitaciones de un extremo al otro.

#### 4.7.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

El siguiente contenido se encuentra en el libro de estadística de Moya Calderon, R. (1991). Los resultados que analizaremos son los siguientes:

**Tabla 89:** RESULTADOS DE ESPESOR SEGÚN EL MÉTODO AV. CIRCUNVALACIÓN.

CIRCUNVALACIÓN			
ESPESOR (cm)			
MÉTODO	TIEMPO 1	TIEMPO 2	TIEMPO 3
PCA-cálculo	23,00	23,00	21,00
PCA	24,00	23,00	21,00
AASHTO 93	25,00	23,00	20,00
WESTERGARD	16,00	16,00	16,00

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 90:** RESULTADOS DE ESPESOR SEGÚN EL MÉTODO AV. JAIME PAZ.

JAIME PAZ ZAMORA			
ESPESOR (cm)			
METODO	TIEMPO 1	TIEMPO 2	TIEMPO 3
PCA-cálculo	20,00	19,00	19,00
PCA	20,00	19,00	19,00
AASHTO 93	19,00	16,00	17,00
WESTERGARD	16,00	16,00	16,00

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 91:** RESULTADOS DE ESPESOR SEGÚN EL MÉTODO INGRESO TERMINAL.

MÉTODO	TERMINAL		
	ESPESOR (cm)		
	TIEMPO 1	TIEMPO 2	TIEMPO 3
PCA-cálculo	23,00	23,00	18,00
PCA	23,00	23,00	18,00
AASHTO 93	25,00	24,00	5,00
WESTERGARD	16,00	16,00	16,00

**Fuente:** Elaboración propia.

Realizamos un ejemplo del tramo la circunvalación tiempo 1

**a) MEDIA ARITMÉTICA.**

$$X = \frac{23 + 24 + 25 + 16}{4}$$

$$X = 22$$

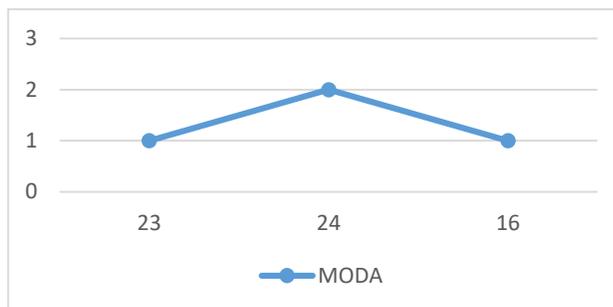
**b) MODA.**

Es el número que se repite con mayor frecuencia en este caso no se repite pero se muestra en un ejemplo:

**Tabla 92:** FRECUENCIA DE VALORES

Valores de variable xi	Frecuencia absoluta
23	1
24	2
16	1

**Fuente:** Elaboración propia.

**Ilustración 51: MODA**

**Fuente:** Elaboración propia.

$$M = 24$$

**c) MEDIANA.**

Se tabulan los datos de menor a mayor:

$$X(1) = 16 ; X(2) = 23 ; X(3) = 24 ; X(4) = 25$$

$$Me = \frac{X\left(\frac{4}{2}\right) + X\left(\frac{4}{2} + 1\right)}{2}$$

$$Me = \frac{X(2) + X(3)}{2} = \frac{23 + 24}{2}$$

$$Me = 23,5$$

**d) VARIANZA**

$$S^2 = \frac{(23 - 21,75)^2 + (24 - 21,75)^2 + (25 - 21,75)^2 + (16 - 21,75)^2}{4}$$

$$S^2 = 12,5$$

**e) DESVIACIÓN ESTANDAR.**

$$S = \sqrt{\frac{(23 - 21,75)^2 + (24 - 21,75)^2 + (25 - 21,75)^2 + (16 - 21,75)^2}{4 - 1}}$$

$$S = 4,08$$

#### 4.7.7.1. RESULTADO DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

##### a) AVENIDA CIRCUNVALACIÓN.

Podemos ver en los primeros resultados que son los datos de entrada en nuestro análisis la diferencia entre los tres primeros métodos en comparación con el método WESTERGARD esto afecta la desviación estándar con un valor elevado, aun así los métodos PCA-cálculo, PCA y AASHTO 93 no se encuentran muy separados de la media.

**Tabla 93:** RESULTADOS ESTADÍSTICOS AV. CIRCUNVALACIÓN.

	CIRCUNVALACIÓN		
	ESPESOR (cm)		
MÉTODO	TIEMPO 1	TIEMPO 2	TIEMPO 3
PCA-cálculo	23,00	23,00	21,00
PCA	24,00	23,00	21,00
AASHTO 93	25,00	23,00	20,00
WESTERGARD	16,00	16,00	16,00
MEDIA	22,00	21,25	19,50
MEDIANA	23,50	23,00	20,50
MODA	-	23,00	21,00
VARIANZA	12,50	9,19	4,25
DESVIACION S.	4,08	3,50	2,38

**Fuente:** Elaboración propia.

**b) AVENIDA JAIME PAZ ZAMORA.**

Este caso la diferencia entre los resultados no son demasiado amplios todos los métodos se encuentran cerca a la media es por esto que la desviación estándar no es alta.

**Tabla 94:** RESULTADOS ESTADÍSTICOS AV. JAIME PAZ.

JAIME PAZ ZAMORA			
ESPESOR (cm)			
METODO	TIEMPO 1	TIEMPO 2	TIEMPO 3
PCA-cálculo	20,00	19,00	19,00
PCA	20,00	19,00	19,00
AASHTO 93	19,00	16,00	17,00
WESTERGARD	16,00	16,00	16,00
MEDIA	18,75	17,50	17,75
MEDIANA	19,50	17,50	18,00
MODA	20,00	19,00	19,00
VARIANZA	2,69	2,25	1,69
DESVIACION	1,89	1,73	1,50

**Fuente:** Elaboración propia.

**c) INGRESO NUEVA TERMINAL.**

En este tramo se sigue observando las limitaciones en los métodos ahora incluyendo el método AASHTO 93, en los puntos anteriores se pudo apreciar estas limitaciones de

es por esto que la desviación es alta sin embargo el método PCA-cálculo y PCA se encuentra próximo a la media lo que nos indica la calidad de sus resultados.

**Tabla 95:** RESULTADOS ESTADÍSTICOS INGRESO TERMINAL.

<b>TERMINAL</b>			
<b>ESPESOR (cm)</b>			
<b>METODO</b>	<b>TIEMPO 1</b>	<b>TIEMPO 2</b>	<b>TIEMPO 3</b>
PCA-cálculo	23,00	23,00	18,00
PCA	23,00	23,00	18,00
AASHTO 93	25,00	24,00	5,00
WESTERGARD	16,00	16,00	16,00
MEDIA	21,75	21,50	14,25
MEDIANA	23,00	23,00	17,00
MODA	23,00	23,00	18,00
VARIANZA	11,69	10,25	29,19
DESVIACION	3,95	3,70	6,24

**Fuente:** Elaboración propia.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **CONCLUSIONES.**

Realizada la aplicación del nuevo software PCA-cálculo se llegó a las siguientes conclusiones:

- Cumplimos el objetivo general de analizar los principios, parámetros, procesamiento y resultados comparando con los métodos tradicionales aplicando en tres tramos de la ciudad de Tarija.
- Se realizó el dimensionamiento de los tres tramos estudiados de la ciudad de Tarija utilizando el software PCA-cálculo dando resultados confiables de manera sencilla y rápida en comparación con los métodos tradicionales que se lo realiza de manera manual volviendo este proceso largo y tedioso. El software PCA-cálculo nos brinda la oportunidad de calcular más alternativas de diseño en un menor tiempo.
- El software usa los principios, parámetros y procesamiento del método PCA, como podemos ver en el análisis es el método con el que trabajamos sin ningún problema y sin limitaciones, además de trabajar con solo tres variables nos dio buenos resultados en comparación a los otros métodos.
- Con el análisis comparativo de métodos se puede ver la clara diferencia de un método a otro al momento de procesar las variable, realizando la comparación de las variables en común para tener una mejor apreciación de un método a otro nos dio como conclusión que el método WESTERGARD es un método antiguo que no cuenta con todas las variables necesarias para el dimensionamiento, el método AASHTO 93 tiene limitaciones en calcular el espesor al aumentar mucho el módulo de reacción de la subrasante y al trabajar con números de ejes equivalentes muy bajos dando resultados muy por fuera de lo normal, mientras que el software y el método PCA nos dio resultados que marcan una clara tendencia en sus resultados pudiendo decir que es el método más confiable.
- El procedimiento de cálculo del método PCA es largo que requiere muchas iteraciones de tablas de forma manual y estimaciones gráficas dando un mayor margen de error sin embargo nos dio resultados iguales al software PCA-cálculo en la mayoría de los resultados con una pequeña variación en algunos casos, el software

deja de lado todo este procedimiento del método realizando las iteraciones necesarias con solo estimar el espesor de losa hasta obtener el espesor adecuado según el proyectista. El procedimiento de cálculo de los métodos AASHTO 93 y WESTERGARD es el uso de una ecuación que se resuelve de manera simple y rápida una vez obtenidos las variables de diseño; en comparación de todos los métodos se llegó a la conclusión que el uso del software PCA-cálculo es indispensable por la velocidad de cálculo, resultados confiables, el uso del método PCA y los pocos datos que requiere para su trabajo, caso contrario el método más factible es el método AASHTO 93 por la simplicidad de su cálculo y buenos resultados.

- Los valores de entrada en el caso del software y el método PCA son los mismos ya que trabajan con el mismo método, 3 de sus 4 valores de entrada son iguales a los del método AASHTO 93 lo que nos indica lo necesario de estos datos de los cuales el método WESTERGARD solo utiliza 1, el método AASHTO 93 requiere 11 valores de entrada dejando una clara diferencia entre los métodos y así llegando a la conclusión de la calidad del software PCA-cálculo con tan pocos valores de entrada aumentando la eficacia del diseño.
- Aplicando el software PCA-cálculo en los tramos de la ciudad de Tarija conseguimos una alternativa de dimensionamiento con los datos actuales:
  - a) En el caso de la avenida Circunvalación el pavimento actual de 21cm. se encuentra sub dimensionado en comparación al software y a los otros métodos es por esto que las fallas ya son visibles en el tramo estudiado comprobando nuestros resultados.
  - b) En la avenida Jaime Paz Zamora el dimensionamiento es contradictorio debido a que el espesor de losa de 22cm. que es mayor a los dimensionamientos previstos por todos los métodos lo que indica que el pavimento es bueno y duradero pero lo que tenemos en realidad es un pavimento muy dañado y no refleja lo calculado (anexo 35), esto debido a que la variable de tráfico utilizada no es la adecuada para el dimensionamiento, ya que en este tramo circulaban todo tipo de vehículos pesados años atrás lo que ocasionaron este daño, pero en la actualidad estos vehículos toman otras rutas lo que provocó la variación en el tráfico, dicho esto

conocemos el porqué de los resultados y el estado del pavimento, en conclusión los resultados obtenidos por el software y los otros métodos son confiables.

- c) En los ingresos a la nueva terminal el pavimento está sobre dimensionado según el software PCA-cálculo y el método PCA ya que tiene un espesor de 25cm. y el cálculo de los dos métodos nos da 23cm; nuestro estudio de tráfico fue realizado en la terminal antigua donde circulaban vehículos de todo tipo y no solo los vehículos con destino a la terminal lo que ocasionó que la variable de tráfico incrementara considerablemente y aun así no alcanzó el espesor de losa de 25cm. lo que en la realidad el tráfico actual en este tramo de la nueva terminal de la ciudad de Tarija en comparación con el tráfico de diseño es bastante reducido con lo que se puede decir que el pavimento debería ser más pequeño. El método AASHTO 93 dio como resultado 25cm. lo que buscábamos para el diseño pero considerando lo mencionado anteriormente se llegó a la conclusión del pavimento sobre dimensionado.

#### **RECOMENDACIONES.**

- El software PCA-cálculo es poco conocido y utilizado en nuestro medio ya que existen otros software para el dimensionamiento del pavimento rígido no obstante es imprescindible la actualización de los mismos dando lugar a programas como el software PCA-cálculo como una nueva herramienta de trabajo.
- El usuario del software PCA-cálculo requiere un conocimiento previo de los pavimentos rígidos, del manual de usuario del software y el funcionamiento del método PCA para conocer sus variables de diseño y los factores que definen la correcta aplicación del software.
- Se debe realizar un estudio riguroso de los valores de entrada ya que estos nos definirán la calidad del diseño por lo tanto los estudios realizados en campo deben contar con el mayor número de muestras posibles para obtener valores de entrada confiables y contar con alternativas, adoptando uno u otro valor teniendo todos los conceptos claros al momento de tomar como dato para el diseño.
- Es recomendable que el ensayo del cono dinámico de penetración no se realice en suelos ya pavimentados ya que el suelo se encuentra confinado dando resultados poco

confiables como se puede ver en nuestro caso, es por esto que utilizamos este ensayo solo para medir la altura de la capa subbase y así estimar un módulo de reacción de la subrasante combinada (K).

---