

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1. Introducción.

Los pavimentos representan una parte importante de los activos viales. Deben ser capaces de soportar solicitudes de tránsito, ambientales y proveer una estructura durable que permita la circulación de los vehículos con comodidad y seguridad. En el diseño de pavimentos tradicionalmente se han usado tecnologías de diseño basadas en pavimentos rígidos y flexibles, masificados en todo el mundo a partir del ensayo AASHO realizado en 1956 en Estados Unidos (AASHTO, 1993). Los pavimentos de adoquines han estado presentes en la ingeniería de pavimentos desde la época del imperio Romano. Pero no es sino hasta la década de 1970 cuando comienza a masificarse el uso de adoquines de hormigón en estacionamientos, calzadas vehiculares, peatonales y espacios públicos. Esto llevó a que diversos países iniciaran la investigación en busca de sus propios métodos de diseño de pavimentos de adoquines. Entre ellos Holanda, Australia y el Reino Unido. En la actualidad existen alrededor de 12 métodos de diseño (Véase a Morrish, 1980; Miura et al., 1984; Rollings, 1984; Houben et al., 1986; Clifford, 1987; Livneh et al., 1988; Eisenmann & Leykauf, 1988; Rada et al., 1990; Judycki et al., 1996; Silfwerbrand & Wäppling, 2000; BSI, 2001a; BSI, 2001b; Ryntathiang et al., 2006).

Los países que no cuentan con un método de diseño propio se ven en la necesidad de adoptar algunos de estos métodos. Esto no necesariamente garantiza su validez al aplicarlo bajo condiciones distintas a aquellas donde el método fue desarrollado y calibrado, ni tampoco asegura un desempeño adecuado del pavimento. Por tanto, una de las tareas esenciales previas a la adopción de un método de diseño es explorar los resultados de diseño frente a condiciones locales y, a la vez, evaluar de una forma sistemática su desempeño potencial. Esto constituye una primera etapa en el camino hacia una calibración local de un método de diseño.

Las piedras generaron los primeros empedrados en la ciudad de La Paz, en los años 1920 y 1930, además se usó para la construcción de edificios emblemáticos, como el Banco Nacional de Bolivia, entre otros.

Eduardo Machicado Saravia, hijo de Flavio Machicado Viscarra, pionero que empezó con la pavimentación de las calles paceñas en 1923, durante el gobierno de Baptista Saavedra, relató a EL DIARIO cómo en ese entonces se discutía en el mundo cuál era el sistema más adecuado para la pavimentación de las ciudades. El adoquín fue el que compitió juntamente con la carpeta asfáltica y el cemento.

Tras un largo debate, finalmente, se llevó a cabo la pavimentación de las primeras cuadras de la calle Comercio, mediante el uso de adoquines elaborados con piedra comanche.

Hasta hace algunos años la calle con superficie de terracería no presentaba ninguna preocupación o molestia en las poblaciones rurales del país, pues el volumen de tránsito vehicular no era significativo, restringiéndose al paso de unas cuantas unidades al día. La conservación de las calles era aceptable y las pequeñas molestias causadas a los vecinos y peatones eran soportables.

Sin embargo, durante los últimos años, con el desarrollo acelerado de la economía nacional, el tránsito vehicular en poblaciones rurales ha crecido considerablemente hasta entonces, y el progreso está estimulado a casi todos los rincones del país. Consecuencia de ello es que en la mayoría de estas poblaciones se manifiesta una creciente protesta y clamor de los vecinos por contar con calles en buenas condiciones de circulación, sin baches polvo o lodazales.

El trabajo a presentar tiene por objetivo obtener un análisis comparativo de los métodos elásticos de diseño de pavimentos de adoquines más relevantes como ser el método mecanicista y el método de los elementos finitos, para así evaluar el desempeño potencial ante diversos escenarios de diseño y emitir recomendaciones orientadas a la futura calibración de un método de diseño de pavimentos de adoquines. Para ello, en primer lugar, se describen los componentes y comportamiento estructural de los pavimentos de adoquines de hormigón.

Ante tal situación, como un aporte al desarrollo de la ingeniería vial en Tarija, se presentará este documento, se reflejará los resultados de nuestra investigación y una

síntesis de los estudios realizados a nivel local con respecto a la utilización y comportamiento de los adoquines una vez sometidos al tráfico, la transmisión de tensiones, esfuerzos y deformación de los métodos para analizar su comportamiento.

Las autoridades municipales de la provincia Méndez, más concretamente el gobierno autónomo de San Lorenzo, se ha visto en la imperativa necesidad de encontrar soluciones viables y económicas que les permitan satisfacer el anhelo de su comunidad.

Por tal motivo en este trabajo de proyecto de grado, se tratará de orientar a las autoridades municipales de San Lorenzo en la elaboración de pavimentos con adoquines de concreto, esperando que con la redacción fraccionada y la presentación semigráfica sea de fácil interpretación y consulta rápida, aun para aquellas personas que no necesariamente tengan que estar muy familiarizadas con los procesos de construcción y sirva de guía para una adecuada pavimentación con adoquines utilizando el mejor método obtenido en este trabajo.

## **1.2. Justificación.**

Mediante el análisis comparativo de estos métodos se demostrará que existen influencias notables en el comportamiento general de la estructura de tales pavimentos, teniendo en cuenta las características geométricas de los que actualmente se utilizan en el país.

Las ciudades urbanas están en constante crecimiento y por lo tanto existen más urbanizaciones que dan origen a nuevos barrios en los cuales deben tener vías de acceso vehicular que no siempre desde su inicio pueden ejecutarse con pavimentos de asfalto u hormigón debido a los costos que no siempre disponen los municipios, por ello es importante disponer en una primera instancia de ejecución de pavimentos urbanos de otras alternativas entre las cuales está el pavimento de adoquines.

Es importante estudiar los principios, bases metodológicas y métodos de dimensionamiento de pavimento de adoquines, pese a que ello ha sido en muchos casos ejecutado de forma empírica; para lograr pavimentos de adoquines adecuados y garantizados en su durabilidad en el tiempo de vida útil es necesario seguir una metodología sustentada científicamente y comprobada, para ello existen varias metodologías en otros países que bien podrían ser consideradas para proyectos en nuestro país.

En los métodos de diseño de pavimentos hay tendencias que a lo largo de los años han sido desarrolladas, las que en cada país han tenido una menor o mayor aceptación, todos con distintos principios y bases, ocurre lo propio con el dimensionamiento de pavimentos por eso es importante realizar análisis comparativo entre métodos elásticos basados en el esfuerzo – deformación, métodos mecanicistas basados en la resistencia de los materiales y elementos finitos que son matemáticos basados en la deformación.

### **1.3. Situación problemática.**

La necesidad de contar con soluciones de pavimentos más resistentes y económicas es una constante en países en vías de desarrollo.

Entre las demandas más importantes de los pavimentos es aplicar el mejor método estructural, para obtener un buen dimensionamiento, de las capas del pavimento en beneficio de la comunidad de San Lorenzo.

Las construcciones de pavimentos económicos tienen como objetivo principal resolver un problema social y técnico, ya que en la actualidad se realizan con alto grado de artesanía poco especializada, obteniéndose como resultado pavimentos poco durables y de baja calidad.

Conociendo la problemática actual de no contar con alternativas para poder desarrollar un buen dimensionamiento del pavimento articulado nace la idea de validar y aplicar los resultados obtenidos con estos materiales no convencionales (adoquines).

Actualmente en el departamento de Tarija no se realizó un análisis comparativo de estos métodos elásticos; para este tipo de pavimentos no convencionales (adoquín), podemos observar que es una gran necesidad de este municipio de San Lorenzo mantener estructuralmente sus pavimentos urbanos en estado colonial y así conservar la autenticidad de la comunidad. Es por eso que se elaborará un análisis comparativo de estos pavimentos para mejorar las calles de la comunidad obteniendo los mejores resultados de estos métodos como ser el método mecanicista y elemento finito y así poder dimensionar un buen pavimento.

#### **1.4. Problema.**

“¿Qué método elástico entre el mecanicista y elemento finito será el mejor para poder realizar el dimensionamiento del pavimento con adoquín para las vías urbanas de la comunidad de San Lorenzo?”

#### **1.5. Objetivo general.**

Comparar los métodos elásticos, mecanicista y elemento finito para el dimensionamiento del pavimento con adoquín en las vías urbanas de la comunidad de San Lorenzo.

##### **1.5.1. Objetivos específicos.**

- Determinar los tramos de estudio considerando el tipo de rodadura en la comunidad de San Lorenzo.
- Determinar el tráfico mediante aforos y las cargas a las que el pavimento será sometido.
- Realizar la caracterización de los suelos mediante los ensayos de granulometría, límites, compactación y CBR de la subbase y subrasante.
- Calcular los espesores para las capas que componen un pavimento con adoquín utilizando el método mecanicista.
- Calcular los espesores para las capas que componen un pavimento con adoquín utilizando el método de los elementos finitos.
- Realizar un análisis de costos y precios unitarios para el tramo a dimensionar.
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos por cada método en base a sus aspectos técnicos y económicos.

#### **1.6. Unidad de estudio y decisión muestral.**

Nuestra unidad de estudio maestra será: “Las vías urbanas de San Lorenzo”

En este trabajo la unidad de estudio se centralizará principalmente en el análisis comparativo más completo en estructuras de pavimentos con la utilización de materiales no convencionales mediante dos importantes métodos basándonos en la metodología elástica; estos métodos de dimensionamiento del pavimento son: el método mecanicista y el método de los elementos finitos.

Métodos elásticos basados en el esfuerzo – deformación, mecanicistas basados en la resistencia de los materiales y elementos finitos que son matemáticos basados en la deformación.

Y mediante estos métodos ampliar el conocimiento para el dimensionamiento del pavimento, analizando sus características con los materiales no convencionales (adoquín).

### **1.6.1. Población.**

Nuestra población será: “Los suelos en estudio y adoquines”

Al ser un trabajo de aplicación se busca determinar el análisis comparativo de dos diferentes métodos elásticos como ser, mecanicista y elemento finito para el dimensionamiento de un pavimento en vías urbanas de la comunidad de San Lorenzo.

Se tomará como población muestras de la subrasante y subbase de 2 calles principales del municipio autónomo de San Lorenzo; los materiales no convencionales (adoquín) también representará una población ya que con estos materiales lograremos pavimentar las calles utilizando el mejor método obtenido para el dimensionamiento del pavimento.

### **1.6.2. Muestra.**

Nuestra Muestra será: “Los suelos y material no convencional (adoquín)”

Para el dimensionamiento del pavimento de este proyecto contaremos con la obtención de muestras de la subrasante y subbase de dos vías principales de alto tráfico de la comunidad de San Lorenzo, y se realizará la caracterización granulométrica de las muestras, límites, compactación y CBR.

Y con referencia a los materiales no convencionales obtener el análisis estadístico de este material el cual será utilizado para el dimensionamiento y posterior pavimentación de estas dos principales vías; con los adoquines se realizará los respectivos ensayos para obtener su respectivo esfuerzo y deformación.

Dependerá mucho del método a elegir para poder obtener un buen dimensionamiento del pavimento basándose en el estudio de suelos y el material con el cual serán pavimentadas estas dos vías.

### **1.6.3. Muestreo.**

Lo que pretende este muestreo es asegurar que la caracterización granulométrica, límites, compactación y CBR estén representados adecuadamente en la muestra.

También incluiremos el tipo de pavimento con los materiales no convencionales que se utilizará en la aplicación del proyecto realizando el análisis comparativo de dos diferentes métodos que estarán sometidos a un estado tensional del pavimento en su estructura.

Específicamente son pavimentos no convencionales como ser el adoquín el cual representa las siguientes características para Bolivia, adoquines ondulados de concreto dobles con calidad evaluada por laboratorio. Nuestras losetas tienen las siguientes características: Rendimiento: 32 pzas/m<sup>2</sup> altura: 10 cm, largo 24 cm, ancho 12 cm peso: 6,9-7 Kg C/pieza. Resistencia: tiene una resistencia a la compresión a 20 Mpa. (Concretec-Bolivia).

### **1.7. Tratamiento estadístico.**

Este estudio de aplicación tiene un carácter comparativo, ya que se realizarán 2 diferentes métodos para el dimensionamiento de pavimentos con materiales no convencionales (adoquín) los cuales nos proporcionarán una serie de datos que tendrán que ser analizados posteriormente, por lo tanto, realizaremos un análisis comparativo.

Contaremos con un conjunto de datos N (datos que representan a la población, que en este caso son los materiales no convencionales), y otro conjunto de datos n (datos que representan la muestra, de la subrasante y subbase), que serán clasificados de acuerdo a las características que cada ensayo solicite para así poder realizar un mejor análisis comparativo de todos los datos.

Para el análisis de resultados se contará con el programa MiniTAB 17.

#### **1.7.1. Teoría estadística que utiliza la aplicación.**

La estadística es una ciencia matemática que se utilizará para describir, analizar e interpretar ciertas características de un conjunto de individuos llamado población. La estadística se divide en dos ramas.

### **1.7.2. Estadística descriptiva.**

Se dedica a los métodos de recolección, descripción, visualización y resumen de datos originados a partir de los fenómenos en estudio. Además, calcula parámetros estadísticos como las medidas de centralización y de dispersión que describen el conjunto estudiado.

Variables dependientes del proyecto:

Y1 = resistencia a la compresión (adoquín).

Y2 = CBR adecuado para la subbase.

Y3 = CBR adecuado para la subrasante.

### **1.7.3. Estadística inferencial.**

Es una parte de la estadística que comprende los métodos y procedimientos que por medio de la inducción determina propiedades de una población estadística, a partir de una parte de esta. Su objetivo es obtener conclusiones útiles para hacer deducciones sobre una totalidad, basándose en la información numérica de la muestra.

Estas inferencias pueden tomar la forma de respuestas a preguntas si/no (prueba de hipótesis), estimaciones de unas características numéricas (estimación), pronósticos de futuras observaciones, descripción de asociación (correlación) o modelamiento de correlaciones entre variables (análisis de regresión).

Estos principios son utilizados en los sistemas de control de calidad; en los laboratorios de ensayo se generan valores numéricos y/o características particulares referentes a un individuo (muestra u objeto de evaluación de la conformidad) y luego se realiza una inferencia para caracterizar y/o asignar un valor numérico que describa a la población en relación con valores esperados.

$$X1 \longrightarrow Y1$$

$$X1 \longrightarrow Y2$$

$$X1 \longrightarrow Y3$$



#### 1.7.4. Parámetros estadísticos muestrales.

Los parámetros muestrales son resúmenes de la información contenida en la muestra que determinan su estructura.

Los parámetros muestrales son variables aleatorias (no son constantes) pues su valor depende de la estructura de la muestra que no es siempre la misma. Como consecuencia de la naturaleza aleatoria del muestreo, a estos parámetros se los suele llamar estadísticos.

Para la evaluación y validación de nuestra investigación utilizaremos la estadística cuyas fórmulas son las siguientes:

##### **Media.**

Es la media aritmética (promedio) de los valores de una variable, suma de los valores dividido por el tamaño muestra.

Conveniente cuando los datos se encuentran simétricamente con respecto a ese valor. Muy sensible a valores extremos. Centro de gravedad de los datos.

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

##### **Mediana.**

Es un conjunto de datos ordenados de menor a mayor, la mediana corresponde al dato central. Aquel que deja un 50% de la información bajo él y el otro 50% es mayor o igual es un valor que divide a las observaciones en dos grupos con el mismo número de individuos. Si el número es de datos par, se elige la media de los datos centrales.

Es conveniente cuando los datos son asimétricos. No es sensible a valores extremos.

$$M_e = \begin{cases} \frac{X_{(\frac{n}{2})} + X_{(\frac{n}{2}+1)}}{2} & \text{Si } n \text{ es par} \\ X_{(\frac{n+1}{2})}' & \text{Si } n \text{ es impar} \end{cases}$$

**Moda.**

Son los valores donde la distribución de frecuencias alcanza un máximo.

**1.7.5. Desviación estándar.**

Es la raíz cuadrada de la varianza; es la más usada de las medidas de dispersión.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Para población.}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Para muestras.}$$

X = se trata de la media seleccionada, se debe seleccionar la que tenga menos dispersión.

**Máximo.**

El máximo es el valor de datos más grande en la muestra. Utilice el máximo para identificar un posible valor atípico o un error de datos. Una de las maneras más sencillas de evaluar la dispersión de los datos, consiste en comparar el mínimo y el máximo.

**Mínimo.**

El mínimo es el valor de datos más pequeños en la muestra. Utilice el mínimo para identificar un posible valor atípico o un error de entrada de datos; una de las maneras más sencillas de evaluar la dispersión de los datos, consiste en comparar el mínimo y el máximo.

**1.8. Alcance.****Capítulo 1 Diseño teórico metodológico.**

En este capítulo se pretende resumir todo el trabajo que se realizará a lo largo del semestre planteando claramente el problema, la justificación y los objetivos, los cuales indican las intenciones que tiene el autor con respecto al proyecto en estudio.

**Capítulo 2 Marco teórico.**

Este capítulo tratará específicamente todos los conceptos para los pavimentos, en especial para los pavimentos con material no convencional (Adoquín), las características más importantes de ellos, se revisara los conceptos básicos de los métodos elásticos (mecanicista y elemento finito) para dimensionar los espesores de los pavimentos a diseñar, también se hará énfasis en los materiales que intervendrán en el dimensionamiento del pavimento como ser el adoquín características del mismo, conocer para qué tipo de tránsito vehicular será diseñado el pavimento, conocer principalmente las

característica del método mecanicista así como del método elemento finito, ventajas utilización, etc.

### **Capítulo 3 Aplicación de la práctica.**

En este capítulo se realizará la ubicación del tramo sobre las calles del municipio de San Lorenzo, se tendrá el respectivo aforo de vehículos para un tránsito liviano, para conocer nuestro tránsito promedio diario (T.P.D.) y tránsito promedio horario (T.P.H.) para el respectivo cálculo de nuestros ejes equivalentes, caracterización de los suelos (granulometría, límites, compactación y CBR), en tres puntos determinados del proyecto con sus respectivas normas, conocer la resistencia a compresión del material (adoquín doble S con características ya estandarizadas) para el pavimento, hacer un análisis estadístico para poder validar nuestros resultados los cuales nos sirvan para el cálculo de los espesores del pavimento, realización de un análisis de costos y precios unitarios de los pavimentos ya dimensionados y lo más importante de este capítulo es poder dimensionar los espesores para el pavimento requerido y conocer la diferencias que presenten con los métodos mencionados.

### **Capítulo 4 Conclusiones y recomendaciones.**

Se realizará un análisis comparativo teniendo como patrones los espesores diseñados por los dos métodos y establecer en base a estos cuál de estos métodos es favorable para el dimensionamiento con este tipo de pavimento (adoquín), finalmente llegar a la conclusión del proyecto realizado.

## CAPÍTULO II

### PAVIMENTOS NO CONVENCIONALES

#### 2. Generalidades.

A partir de 1960, producto de perfeccionadas tecnologías de prefabricación de hormigón, se encuentra el adoquín como elemento básico constitutivo de los pavimentos articulados.

A pesar de que la utilización de los pavimentos de adoquín tiene una larga historia, la investigación sobre su comportamiento estructural y el desarrollo de métodos de diseño se apoya en datos experimentales.

Uno de los problemas más importantes a los que se enfrenta cualquier persona relacionada con la planeación, diseño y construcción de la infraestructura de alguna comunidad, es comprender las múltiples interrelaciones entre los elementos que conforman la estructura urbana y sus interacciones con el medio natural.

Dentro de las actividades urbanísticas requeridas para el desarrollo del proyecto urbanístico del municipio de San Lorenzo en el departamento de Tarija, se tiene proyectada la pavimentación de las vías internas con una superficie de pavimento con adoquines.

El diseño de la estructura para pavimentos con adoquines es un tema de estudio e investigación como consecuencia de los diversos resultados obtenidos en la construcción y particularmente en la recuperación de las estructuras de las vías vehiculares pavimentadas.

La importancia de los pavimentos en la economía y en el desarrollo de los pueblos se obtienen gracias a que generan impactos positivos de comodidad con respecto a su rapidez, seguridad, confort, mitigación ambiental, disminución costos de operación vehicular, disminución costos de mantenimiento.

## **2.1 Factores que intervienen en el diseño de una carretera o camino.**

Existen factores de distinta naturaleza que influyen en diversos grados en el diseño de una carretera. No siempre es posible considerarlos explícitamente en una instrucción o recomendación de diseño en la justa proporción que les puede corresponder.

En consideración a lo anterior, en cada proyecto será necesario examinar la especial relevancia que pueda adquirir uno o varios factores.

### **2.1.1. Factores funcionales y físicos.**

Tienen relación, en general, con el servicio para el cual la carretera debe ser diseñada, destacándose los siguientes:

Función que debe cumplir la carretera.

Volumen y características del tránsito.

Velocidad de proyecto y velocidad de operación deseable.

Seguridad para el usuario y la comunidad.

Relación con otras vías y la propiedad adyacente.

Dicen relación con las condiciones impuestas por la naturaleza en la zona del trazado y suelen implicar restricciones que la clasificación para diseño debe considerar. Los principales son:

Relieve.

Hidrografía.

Geología.

Clima.

### **2.1.2. Factores de costo asociados a la carretera.**

Los costos asociados a una carretera son consecuencia de la categoría de diseño adoptada para ella. Esta relación es tan directa que muchas veces actúa como un criterio realimentador que obliga a modificar decisiones previas respecto de las características asignadas a un Proyecto.

Estas situaciones se resolverán mediante los estudios económicos de Prefactibilidad o Factibilidad.

### **2.1.3. Factores humanos y ambientales.**

Las decisiones tecnológicas están sin duda relacionadas con las características de la comunidad a la que se pretende servir y el medio ambiente en que ésta se inserta. Algunos de los factores humanos y ambientales que influyen en mayor grado las decisiones en relación a un proyecto de carreteras son:

Idiosincrasia de usuarios y peatones.

Uso de la tierra adyacente al eje vial.

Actividad de la zona de influencia.

Aspectos ambientales-impacto y mitigación.

El manual de diseño para carreteras ABC nos indica que uno de los factores más relevantes como ser relieve, tráfico y la función la cual cumplirá el tramo a elegir para poder diseñar una vía, para este proyecto, se partió fundamentalmente por el relieve y tráfico que presentaban estas vías en estudio; las calles en estudio son; calle C.G.Zilvetty y G. Lunda de la comunidad de San Lorenzo, estas calles presentan en su pavimento capas de rodadura de material no convencional (adoquín) y presencia de tráfico puntos fundamentales los cuales nos ayudarán al dimensionamiento de un nuevo pavimento con este material implementando los métodos mecanicista y elemento finito.

## **2.2. Tráfico y Aforo vehicular.**

El método los pavimentos se proyectarán para que resistan determinado número de cargas durante su vida útil. Los vehículos transmiten carga al pavimento mediante dispositivos de

apoyo multiruedas de diferentes ejes. Siendo el tráfico uno de los parámetros importantes para el diseño de pavimentos a partir de aforos iniciales y datos históricos de los mismos; el número y composición de los ejes se determina a partir de los siguientes datos:

El TPDA es el promedio aritmético de los volúmenes diarios de tránsito encuestados durante un año, con una clasificación de vehículos utilizada por tipo y uso. Según la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras) se tiene para cada tipo de vehículo la tabla mostrada en Anexos (Tabla A6-8.) sobre la clasificación de vehículos.

El aforo vehicular es el conteo de vehículos. El aforo es una muestra de los volúmenes para el periodo en el que se realiza y tiene por objetivo cuantificar el número de vehículos que pasan por un punto, sección de un camino o a una intersección.

### **2.2.1. Modalidades para aforos de tránsito.**

#### **Aforos Manuales.**

Son aquellos que registran a vehículos haciendo trazos en un papel o con contadores manuales. Mediante éstos es posible conseguir datos que no pueden ser obtenidos por otros procedimientos, como clasificar a los vehículos por tipo, número de ellos que giran u ocupantes de los mismos. Los recuentos pueden dividirse en 30 minutos e incluso 15 cuando el tránsito es muy denso. Para hacer los recuentos se deben preparar hojas de campo.

Se usan por lo general para contabilizar volúmenes de giro y volúmenes clasificados.

La duración del aforo varía con el propósito del aforo. Algunos aforos clasificados pueden durar hasta 24 horas.

El equipo usado es variado; desde hojas de papel marcando cada vehículo hasta contadores electrónicos con teclados. Ambos métodos son manuales.

Durante periodos de tránsito alto, es necesario más de una persona para efectuar los aforos. La exactitud y confiabilidad de los aforos depende del tipo y cantidad del personal, instrucciones, supervisión y la cantidad de información a ser obtenida por cada persona.

### **2.2.2. Tránsito Promedio Diario (T.P.D.).**

Se suelen llamar así a la cantidad de vehículos que circulan por una sección en un periodo de tiempo de un día (T=1 día); recibe la denominación de promedio cuando se hace un estudio mayor a un mes en el cual se repiten los días del estudio. Cuando el estudio dura un año o más se lo denomina tránsito promedio diario anual (T.P.D.A.).

Se emplea especialmente en estudios económicos porque representa la utilización o servicio de la vía, para determinar la distribución de fondos, estudios sobre ingresos, etc.

### **2.2.3. Tránsito Promedio Horario (T.P.H.).**

Llamado así al número de vehículos que circulan en un periodo de tiempo de una hora (T=1 hr.) este valor identifica la variación de volumen ocurrida en una hora dando lugar a poder obtenerse datos sobre la hora de mayor número de vehículos en circulación (hora pico) o de menor circulación (horas de baja intensidad).

Si bien es más importante información del tráfico horario, también es cierto que resulta más costoso obtener esta información debiendo tenerse mayor personal, mayores puntos de aforo y por lo tanto un mayor costo.

Cuando no es posible tener información sobre el tránsito promedio horario se puede utilizar la relación establecida por la AASTHO y por la AIPCR, organismos que han estudiado el efecto del volumen del tráfico, quienes establecen la siguiente relación:

$$TPH = (12\% - 15\%) TPD$$

### **2.2.4. Tráfico de diseño.**

El tráfico es una de las variables más significativas del diseño de pavimentos; la metodología AASHTO considera el periodo de diseño de un pavimento, relacionada con el número de repeticiones de carga que podrá soportar el pavimento antes de llegar a las condiciones de servicio final predeterminadas para el camino, el cual es definido de acuerdo al Tránsito Promedio Diario (TPD). Estos volúmenes son establecidos en base a datos de conteo del tráfico. En las Tablas 24 y 26 del capítulo 3 se resume el Tráfico para la aplicación de diseño para un periodo de diseño de 20 años.



Tabla 1. Clasificación tráfico promedio diario

Vehículos/día	TPD
<2941	Bajo
2942 - 5254	Medio
>5255	Alto

Fuente: Modelo de evaluación dinámica de la calidad en la infraestructura vial

(RODA 2009)

Tabla 2. Rango de tráfico según los ejes equivalentes.

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS	
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	T <sub>P0</sub>	100,001	150,000
	T <sub>P1</sub>	150,001	300,000
	T <sub>P2</sub>	300,001	500,000
	T <sub>P3</sub>	500,001	750,000
	T <sub>P4</sub>	750,001	1,000,000
Resto de Caminos	T <sub>P5</sub>	1,000,001	1,500,000
	T <sub>P6</sub>	1,500,001	3,000,000
	T <sub>P7</sub>	3,000,001	5,000,000
	T <sub>P8</sub>	5,000,001	7,500,000
	T <sub>P9</sub>	7,500,001	10'000,000
	T <sub>P10</sub>	10'000,001	12'500,000
	T <sub>P11</sub>	12'500,001	15'000,000
	T <sub>P12</sub>	15'000,001	20'000,000
	T <sub>P13</sub>	20'000,001	25'000,000
	T <sub>P14</sub>	25'000,001	30'000,000
	T <sub>P15</sub>	>30'000,000	

Fuente: Diseño de pavimentos método AASHTO 93

### 2.3. Configuraciones de eje.

Eje es un conjunto de dos o más ruedas que transmiten el peso al camino. Se las define de la siguiente manera:

Eje delantero: eje que se encuentra en la parte delantera del vehículo.

Eje central: eje que se encuentra en la parte central del vehículo.

Eje posterior: eje que se encuentra en la parte posterior del vehículo.

Eje retráctil: conjunto de dos o más ruedas que está provisto de un dispositivo mecánico, hidráulico que sirve para modificar el peso transmitido a la superficie de la vía y que puede elevar sus neumáticos y no tocar la superficie de rodadura.

### 2.3.1. Tipo de ejes.

Eje simple: se denomina al elemento por un solo eje no articulado a otro, puede ser motriz o no direccional o no anterior central o posterior.

Figura 1. Peso admisible de eje simple 2 neumáticos de 7000 Kg.



Fuente: Guía para diseño de pavimentos, AASHTO 1993.

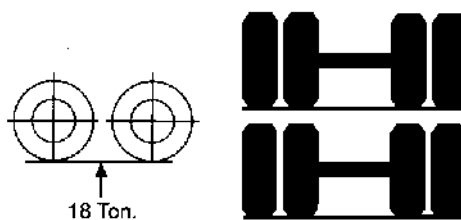
Figura 2. Peso admisible eje simple de 4 neumáticos es de 11000 Kg.



Fuente: Guía para diseño de pavimentos, AASHTO 1993

Eje tándem constituido por dos ejes articulados al vehículo por dispositivos comunes separados por una distancia menor a 2.4m.

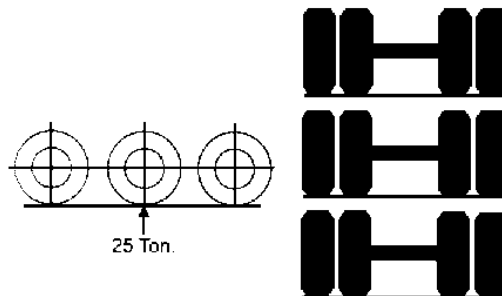
Figura 3. Peso máximo admisible para un eje tándem de 8 neumáticos de 18000 kg.



Fuente: Guía para diseño de pavimentos, AASHTO 1993

Se denomina eje trídem a una combinación de tres ejes separados por una distancia no menor de 2.4m.

Figura 4. Peso máximo admisible para eje trídem de 6 neumáticos es de 25000 kg.



Fuente: Guía para diseño de pavimentos, AASHTO 1993

### 2.3.2. Conversión de tránsito a ejes equivalentes ESALs.

Según el método AASHTO los pavimentos se diseñan para que resistan una determinada cantidad, estas cargas son producidas por una diversidad de vehículos, de diferentes pesos y cantidad de ejes. Ante esta variedad y a efectos de cálculo, el método propone transformar en número de ejes equivalentes de 80 KN o 18 Kips.

### 2.3.3. Factores equivalentes de carga (LEF).

En la conversión de tráfico a un número de ESAL's de 18 kips (Equivalent Single Axis Loads) se utiliza factores equivalentes de carga LEFs (Load Equivalent Factor).

El factor equivalente de carga LEF es un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad ocasionada por una determinada carga de un tipo de eje y la producida por el eje patrón de 18 kips.

$$LEF = \frac{N^{\circ} \text{de ESALs de 18 kips que producen una pérdida de serviciabilidad } \Delta PSI}{N^{\circ} \text{de ejes X kips que producen la misma pérdida de serviciabilidad}}$$

Los factores equivalentes de carga de la AASHTO están tabulados en función de cuatro parámetros: tipo de eje (simple, tándem, trídem), índice de serviciabilidad final (2, 2,5 y 3), carga por eje, y número estructural SN del pavimento (de 1 a 6").

#### 2.3.4. Factor de camión.

Para expresar el tráfico, en términos del deterioro, que produce un vehículo en particular, hay que considerar la suma de los daños producidos por cada eje de ese tipo de vehículo. De este criterio nace el concepto de Factor de Camión, que se define como el número de ESAL's por número de vehículo. Este factor puede ser calculado para cada tipo de camiones, o para todos los vehículos como un promedio de una determinada configuración de tráfico.

$$Factor\ camión = TF = \frac{N^0 ESALs}{N^0 de\ camiones}$$

Se ha demostrado que el eje delantero tiene una mínima influencia en el daño producido en el pavimento, por ejemplo, en el ahuellamiento, la fisuración y la pérdida de serviciabilidad su participación varía de 0,13 al 2,1 %. Por esta razón el eje delantero no está incluido en los factores de equivalencia de carga, lo cual no afecta a la exactitud del cálculo. Es conveniente calcular el factor de camión para cada tipo de vehículo.

#### 2.3.5. Número de ejes equivalentes (ESAL's).

Se calcula para el carril de diseño utilizando la siguiente ecuación:

$$ESAL's = TPD * \frac{(1+i)^t - 1}{\ln(1+i)} * DD * DC * FC * 365$$

Donde:

TPD: Tránsito promedio diario.

FC: Factor de crecimiento para un período de diseño en años.

DD: Distribución direccional.

DI: Distribución por carril.

t: Tiempo de diseño.

### 2.3.6. Nivel de confianza y desviación estándar.

El nivel de confianza es uno de los parámetros importantes introducidos por la AASHTO al diseño de pavimentos, porque establece un criterio que está relacionado con el desempeño del pavimento frente a las solicitaciones exteriores. La confiabilidad se define como la probabilidad de que el pavimento diseñado se comporte de manera satisfactoria durante toda su vida de proyecto, bajo las solicitaciones de carga e intemperismo, o la probabilidad de que los problemas de deformación y fallas estén por debajo de los niveles permisibles. Para elegir el valor de este parámetro se considera la importancia del camino, la confiabilidad de la resistencia de cada una de las capas y el tránsito de diseño pronosticado; el nivel de confianza se puede ver en tabla en Anexos (Tabla A6-4).

La esquematización del comportamiento real del pavimento y la curva de diseño propuesta por la AASHTO tienen la misma forma, pero no coinciden. La falta de coincidencia se debe a los errores asociados a la ecuación de comportamiento propuesta y a la dispersión de la información utilizada en el dimensionamiento del pavimento. Por esta razón la AASHTO adoptó un enfoque de regresiones para ajustar estas dos curvas. De esta forma los errores se representan mediante una desviación estándar  $S_o$ , para compatibilizar los dos comportamientos. El factor de ajuste entre las dos curvas se define como el producto de la desviación normal  $ZR$ , por la desviación estándar  $S_o$ . Los factores de desviación normal  $ZR$  se muestran en tabla en Anexos (Tabla A6-5).

Para una construcción por etapas, la vida útil ha de ser menor al periodo de análisis (vida útil < periodo de análisis), en este caso se deben considerar las confiabilidades de todo el periodo de diseño, de donde resulta que:

$$R_{etapa} = (R_{total})^{1/n}$$

Donde:

$n$  = número de etapas previstas.

Una vez elegido un nivel de confianza y obtenidos los resultados del diseño, éstos deberán ser corregidos por dos tipos de incertidumbre: la confiabilidad de los parámetros de entrada, y de las propias ecuaciones de diseño basadas en los tramos de prueba. Para este fin, se considera un factor de corrección que representa la desviación estándar, de manera

reducida y simple; este factor evalúa los datos dispersos que configuran la curva real de comportamiento del pavimento.

### **2.3.7. Distribución direccional “DD”.**

La distribución se toma un 50% de tránsito por cada dirección del flujo vehicular censado, en algunos casos puede ser mayor en una dirección de 0.3 – 0.7 dependiendo de la dirección acumulada de vehículos cargados.

### **2.3.8. Factor de distribución por carril “DI”.**

El carril de diseño es aquella que recibe el mayor número de ESALs, para vías de dos carriles, por lo cual el factor de distribución es 100%. Para autopistas multicarriles el carril de diseño es el carril exterior y el factor de distribución depende del número de carriles en cada dirección que tenga la autopista. En la tabla factor de distribución por carril en Anexos (Tabla A6-3) se muestran los valores utilizados por la AASHTO.

## **2.4. El pavimento.**

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, edemas de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aún 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.

En general los pavimentos son estructuras complejas constituidas por una serie de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y se construyen técnicamente con materiales seleccionados con características específicas y adecuadamente compactados.

La resistencia requerida para estas estructuras está afectada por la capacidad de soporte a compresión de la sub-rasante, es por tal razón que la función estructural de un pavimento

es disminuir los esfuerzos generados por las cargas impuestas debido a la acción de tránsito.

Los materiales de las capas se escogen según su costo y disponibilidad, y mientras más superficiales estén, mejores (más resistentes) deberán ser. A la capa de la superficie se la denomina capa de rodadura y es la que está en contacto directo con el tránsito. A las capas inferiores se les llama base (cuando tiene solo una) o base y sub-base (cuando se tienen dos). Al terreno natural o suelo se le conoce como subrasante y es el encargado de soportar el pavimento.

#### **2.4.1. Subrasante.**

Es indudablemente el estrato más importante dentro de la estructura de la vía, por ser el que finalmente soporta las cargas y los esfuerzos producidos por: las otras capas, el tráfico y los agentes externos.

Está constituida por el suelo natural, una vez retirado el descapote, en una amplia gama de materiales y en algunas oportunidades por materiales gravo-arcillosos colocados por el hombre.

En todos los casos, la capacidad de soporte de este estrato es determinante en el espesor que debe tener la estructura total del pavimento y por ende en el consumo de materiales y el costo final de la vía. Cuando está constituida por arcillas con algún grado de plasticidad y expansibilidad, como sucede en la mayoría de los suelos de nuestro país, en el procedimiento habitual nos vemos obligados a efectuar reemplazos por materiales importados con el consecuente incremento en los costos y en el deterioro ambiental. Por estas razones indudablemente el objetivo más importante de estas alternativas es suministrar y aplicar los correctivos necesarios que nos permitan soportar nuestra vía, y construir las estructuras sobre y con estos materiales, sin consecuencias desfavorables.

Debemos tener siempre en cuenta que por muy alta que sea la técnica que apliquemos y la calidad de los materiales que utilicemos en la construcción de la estructura de un pavimento, si la subrasante de apoyo es de baja capacidad y bajos perfil y comportamiento, siempre se presentarán, en el corto plazo, deficiencias y fallas de muy difícil corrección y que implicarán altos costos a posteriori.

### **2.4.2. Sub-base.**

Es la que ejerce las funciones de rodadura, es una capa que debe estar diseñada y construida para soportar los esfuerzos y deformaciones transmitidos por las cargas a través de las capas superiores y llevarlos a un nivel y en una intensidad apropiadas a la subrasante, sin superar su capacidad de soporte.

Debe ser una capa de transición que impide la pérdida y contaminación de los materiales que se le superponen para constituir la base y a su vez, debe absorber las presiones y deformaciones que pueden presentarse, evitando que se reflejen y deterioren la rodadura.

### **2.4.3. Base.**

La función de esta capa es proporcionar la resistencia necesaria para distribuir y transmitir los esfuerzos recibidos en magnitud e intensidad adecuadas a las capas inferiores, es una capa constituida generalmente por materiales pétreos seleccionados provenientes de fuentes o de la trituración de rocas y/o gravas.

En los procedimientos habituales, es la capa más exigente respecto de las especificaciones, es de todos conocido: la escasez, el deterioro ecológico las dificultades y altos costos que implica, en la mayoría de las oportunidades, la conservación de estos materiales en nuestro medio, debemos conocer y aplicar entonces las alternativas que ofrecen estas tecnologías para con materiales de menor costo subsanar, hasta donde sea posible, estas dificultades.

La generalidad de los procedimientos, que se empleaban hasta ahora, en busca de la solución de estos inconvenientes, estaban basados en el empleo de cales y cementos en oportunidades con aditivos, que mezclados, mediante procesos exóticos y complicados, con los materiales fino-gravosos, que encontramos en el área de influencia de la vía en cuestión, los lleven a cumplir, si no con todas las características físicas exigidas, si con las más importantes de capacidad de soporte CBR y de comportamiento para ser utilizadas. También y desde tiempos inmemoriales, el hombre emplea, para la solución de estos inconvenientes, los productos bituminosos, que encuentra en la naturaleza, rudos y emulsiones, con aditivos o sin ellos, cuyo efecto es temporal.



#### **2.4.4. Capa de rodadura.**

La capa de rodadura de una vía debe ser impermeable, brindar protección a las otras capas de la estructura que la soportan, ofrecer una superficie estable, uniforme y de textura adecuada y tiene como función principal, además de las indicadas, proporcionar a los vehículos que circulan sobre ella un tránsito permanentemente seguro, confiable y agradable. En el procedimiento habitual de construcción de vías, existen varias alternativas para constituir la rodadura, pero todas ellas tienen el común denominador de ser muy exigentes en las características y especificaciones de los agregados que requieren en su composición y estos agregados y su consecución presentan, en la mayoría de los casos en nuestro medio y en mayor grado, los mismos inconvenientes y dificultades analizadas atrás para los materiales que se utilizan para construir la capa de base y en algunas oportunidades presentan fracción fina plástica y al igual que para las capas anteriores debemos aplicar los alivios que nos brindan estas tecnologías.

Las carpetas asfálticas tradicionales son una mezcla de agregados de trituración, debidamente gradados con cemento asfáltico en caliente o en frío, en capas relativamente gruesas que además de cumplir las funciones enunciadas atrás para la capa de rodadura, deben suplir parte de la función estructural transmitiendo los esfuerzos que le induce el tráfico en forma correcta a las capas inferiores.

Protectora e impermeabilizante que impide que los agentes climáticos lleguen y afecten los otros estratos de la estructura y la de suministrar una superficie que brinde las condiciones necesarias para el tráfico vehicular.

Otra alternativa que puede emplearse, cuando los presupuestos y/o las condiciones lo permiten, consiste en construir rodaduras, en pavimento rígido, de más alto costo, pero de mayor vida útil. En las estructuras para este tipo de rodaduras, puede obviarse la capa de base y se construye, sobre la sub-base.

Como lo hemos analizado atrás, en nuestro medio todas las capas componentes de la estructura vial, generalmente causan sobrecostos y presentan inconvenientes, pero también, existen las tecnologías que ofrecen soluciones que, utilizando los equipos habituales reducen:

Los costos, los perjuicios ecológicos y nos permiten mejorar el comportamiento y las características de los materiales del área de influencia, construir con ellos una estructura vial económica y confiable que nos permita salir del atraso en que nos encontramos y despegar con el progreso que deseamos y que merecen nuestros compatriotas y esta querida y sufrida patria Boliviana.

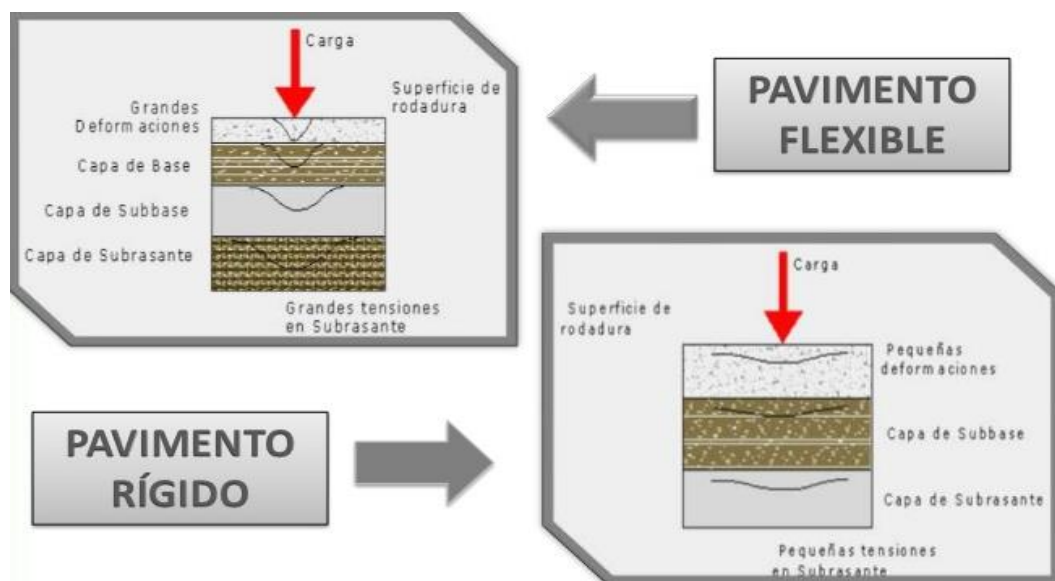
## 2.5. Tipos de pavimentos.

Pavimentos asfálticos o flexibles son aquellos construidos con materiales asfálticos y materiales granulares.

Pavimentos de concreto o rígidos son pavimentos construidos con hormigón de cemento portland y materiales granulares.

Otros pavimentos son adoquines, empedrados y suelo cemento.

Figura 5. Comportamiento de un sistema de pavimentos.



Fuente: Universidad Católica de Loja (Ecuador).

### 2.5.1. Pavimentos convencionales (Pavimento flexible).

Son aquellos que generalmente tienen un revestimiento de concreto asfáltico sobre una capa base; el concreto asfáltico al tener menos rigidez tiene mayor deformación que la del hormigón y produce tensiones mayores en la Subrasante, de tal forma que las capas de revestimiento y base absorben las tensiones verticales de compresión.

La repetición de las tensiones y deformaciones verticales de compresión que actúan en todas las capas del pavimento producen la formación de hundimientos en la trilla de rueda, cuando el tráfico tiende una elevación significativa.

Además de considerar de que el espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante.

Los elementos que integran el pavimento flexible son:

**Capa sub base:** Destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento. Esta capa se encuentra entre la capa Base y Subrasante sirviendo como material de transición.

**Capa base:** Es la capa del pavimento que tiene como función primordial resistir, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito, a la sub base a través de esta a la subrasante y es la capa sobre la cual se coloca la capa de rodadura.

**Superficie de rodadura:** Es la capa que se coloca sobre la capa base, su objetivo principal es proteger la estructura del pavimento, impermeabilizando la superficie, para evitar filtraciones de agua. Evita la desintegración de las capas subyacentes a causa del tránsito vehicular.

Figura 6. Sección transversal del pavimento flexible.



Fuente: Diseño de pavimentos flexibles método AASTHO 93.

Figura 7. Pavimento flexible



Fuente: ABC tramo Chiñata – Colomi, carretera a Santa Cruz.

### 2.5.2. Pavimentos convencionales (Pavimento rígido).

Son pavimentos en los que el principal componente estructural son las losas de concreto de cemento Portland, la cual debido a su rigidez produce una buena distribución de las cargas de ruedas dando tensiones muy bajas en la Subrasante.

La capa inmediatamente inferior a las losas de concreto, pueden ser base o sub-base cuya capacidad de soporte sea inferior a la requerida por los materiales de la capa base de los pavimentos flexibles.

El elemento principal de estos pavimentos es concreto de cemento portland, es la capa superior de la estructura de pavimento, construido de concreto hidráulico, por lo que, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa.

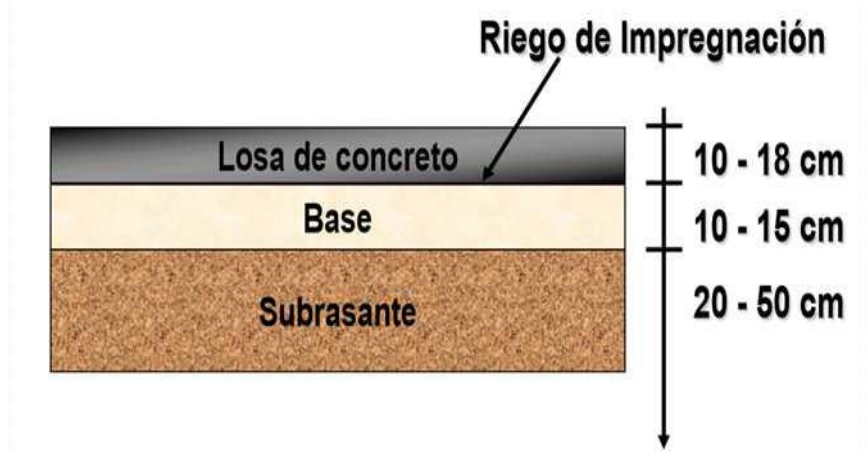
Estas se dividen en tres tipos:

**Concreto hidráulico simple u Hormigón simple:** Estas no contienen armadura en la losa y el espaciamiento es pequeño (2.50 a 4.50m). Las juntas pueden o no tener dispositivos de transferencia de cargas.

**Concreto Hidráulico Reforzado u Hormigón Armado con juntas:** tienen espaciamientos mayores entre juntas (6.10 a 38.60m) y llevan armadura distribuida en la losa a efecto de controlar y mantener cerradas las fisuras de contracción.

**Concreto Hidráulico Reforzado Continuo u Hormigón Armado Continuo:** Tiene armadura longitudinal continua y no tiene juntas transversales, excepto juntas de construcción, la armadura transversal es opcional en este caso. Estos pavimentos tienen más armaduras que las juntas armadas y el objetivo de esta armadura es mantener un espaciamiento adecuado entre fisuras y que estas permanezcan cerradas.

Figura 8. Sección transversal del pavimento rígido.



Fuente: Diseño de pavimentos rígidos método AASTHO 93.

Figura 9. Pavimento rígido.



Fuente. Civilgeeks.com 10/06/2012 diseño de pavimentos rígidos.

## 2.6. Pavimentos no convencionales (Pavimento articulado).

Se entiende por pavimento la estructura superficial compuesta generalmente por varias capas de diferentes materiales que sirve de acabado a una vía, ya sea vehicular o peatonal, cuyo fin es dar resistencia estructural para atender el paso de los vehículos o peatones, y por medio de su capa superior, controlar la erosión por acción del agua o el viento de los materiales que conforman la base de dicha vía, complementando su estructura.

Los pavimentos articulados son aquellos en los cuales la capa superior o acabado del pavimento está constituida por elementos prefabricados de concreto, piezas de arcilla cocida, o piedras duras en su forma natural o cortadas siguiendo algún patrón modular, que empalman entre sí sin emplear materiales cementantes para fijarlos. Su origen se encuentra en los antiguos empedrados. En este proyecto de grado nos referiremos a los pavimentos articulados que empleen adoquines de concretos prefabricados.

Figura 10. Pavimento no convencional.



Fuente: [Notife.com/598716 obras de pavimento articulado](https://www.notife.com/598716-obras-de-pavimento-articulado).

Los pavimentos de adoquines se componen de distintas capas al igual que los pavimentos rígidos y flexibles. La principal diferencia con estos últimos radica en la composición de la carpeta de rodadura, que está conformada por adoquines intertrabados, que brindan al pavimento un comportamiento estructural semiflexible. De este modo, los pavimentos de adoquines están constituidos por una capa de adoquines, arena de juntas, una cama de arena, base y sub-base. Poseen también un borde de confinamiento que contribuye al

desarrollo del mecanismo de trabazón mecánica. (Rodrigo Bahamontes, pavimentos de adoquines de hormigón).

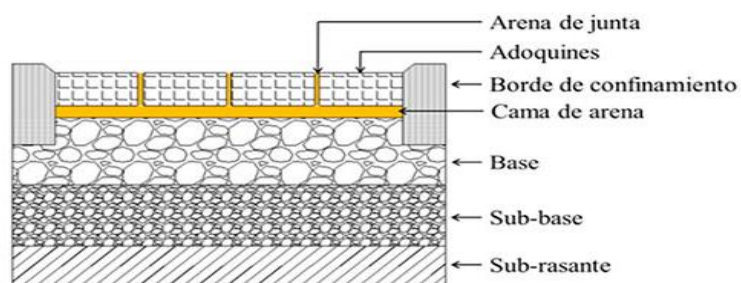
Para formar la superficie del pavimento, los adoquines deben ser de buena calidad, capaces de soportar el tránsito al menos durante 40 años y tener una buena apariencia por ser la parte visible del pavimento. La superficie de los adoquines es de color uniforme, bajo ninguna circunstancia presentarán fisuras, huecos o materiales extraños, los bordes serán agudos y sin sobrantes de concreto.

La resistencia de los adoquines debe ser la necesaria para contrarrestar la abrasión del tránsito y no fracturarse bajo la acción del tráfico pesado, por tanto, los materiales utilizados en su fabricación, deben cumplir con los requerimientos establecidos en las especificaciones correspondientes para el concreto hidráulico.

El adoquín tiene un campo de aplicación bastante amplio, limitado casi únicamente por la imaginación. Comúnmente se utilizan en andenes peatonales, estacionamientos, vías urbanas y rurales, ciclo-vías, patios, accesos, campamentos, estaciones de servicio, pisos industriales, revestimiento de taludes y cauces, puertos, terminales de carga, entre otros. Ha sido comprobado que su utilización puede ser la solución ideal en países donde el mantenimiento de carreteras es muy poco, debido principalmente a la escasez de fondos.

La propiedad de distribuir las cargas de los adoquines de concreto depende principalmente de la forma, el espesor, la resistencia mecánica y la colocación. Los pavimentos de adoquines de concreto tienen un amplio rango de aplicación, por lo que se hace necesario formular diseños diferentes, según el uso previsto y la capacidad del suelo sobre el cual se va a construir el pavimento.

Figura 11. Elemento estructural de un pavimento de adoquines (ASCE,2010)



Fuente: Revista de la construcción, Univ. Concepción. (Chile).

### **2.6.1. Fallas del pavimento articulado (adoquín).**

Pueden producirse por degradación de la base, si ésta no es la adecuada, en cuyo caso, los elementos se desnivelan o se hunden, pero no se rompen; por lo tanto, en caso de reconstrucción, el valor residual del pavimento articulado es elevado, puesto que una vez reparada o reemplazada la base, pueden volver a utilizarse los mismos elementos.

### **2.6.2. Comportamiento estructural de los pavimentos articulados (adoquín).**

Los adoquines, arena de juntas y cama de arena generan un mecanismo de trabazón mecánica entre los adoquines mediante el cual son capaces de disipar tensiones, transmitiendo carga entre adoquines adyacentes. Shackel & Lim (2003) describen el mecanismo de trabazón mecánica como el resultado del efecto combinado de cuña y rotación que se produce entre adoquines al ser cargados. En el efecto de cuña el adoquín cargado empuja longitudinalmente los adoquines vecinos; el efecto de rotación en tanto, hace girar los adoquines vecinos en torno a alguno o varios de sus ejes. En adoquines rectangulares se produce el efecto de cuña o el efecto combinado de cuña y rotación en el caso de adoquines de caras dentadas. A lo anterior se agrega el aporte de la fricción entre las caras laterales de los adoquines, inducido por la arena en las juntas.

Otro aspecto particular de los pavimentos de adoquines es que la trabazón mecánica aumenta con la aplicación de cargas verticales hasta llegar a un nivel de equilibrio. Este se alcanza aproximadamente después de 10.000 repeticiones de carga de un eje estándar (ejes equivalentes acumulados, EEA) (Houben et al., 1986; Rada et al., 1990). Este comportamiento tiene asociado un aumento en la rigidez de la carpeta de rodadura, con lo cual aumenta su capacidad de disipar tensiones y consecuentemente disminuyen las tensiones que se transmiten a las capas inferiores del pavimento. Houben et al. (1986) verificaron este aumento de la rigidez a través de mediciones en tramos de prueba y lo asociaron al comportamiento de las deformaciones permanentes del pavimento. Propusieron un modelo de progresión de las deformaciones permanentes en función de EEA de 80 kN.

El modelo de Houben et al. (1986), plantea que las deformaciones elásticas mantienen un nivel constante mientras se desarrolla la trabazón mecánica, hasta que alcanzan su nivel de equilibrio, lo cual ocurre cuando los ejes equivalentes acumulados alcanzan un valor



crítico Luego las deformaciones elásticas disminuyen de manera progresiva. Asimismo, las deformaciones permanentes aumentan a una tasa de acumulación decreciente.

Houben et al. (1986) utilizaron su modelo de progresión de las deformaciones permanentes para proponer un método de diseño para las condiciones de suelo y materiales de Holanda, usando como criterio de diseño el ahuellamiento en el pavimento.

Estudios realizados por diversos autores, han demostrado que los pavimentos de adoquines exhiben un comportamiento similar a los pavimentos flexibles tradicionales, fundamentalmente en lo que se refiere a las propiedades de distribución de tensiones y desarrollo de deformaciones.

## **2.7. Tipos de pavimentos no convencionales.**

Históricamente, los cuatro tipos de adoquines que se han utilizado para pavimentar áreas urbanas son los adoquines de piedra, los de madera, los cerámicos y los de hormigón.

Los primeros adoquines de piedra que se utilizaron fueron guijarros de río colocados sobre una capa de arena sellándose las juntas con una argamasa de cal y arena.

Los adoquines de madera se usaron en la primera mitad del siglo XIX, como una alternativa a los adoquines de piedra, para intentar reducir así, el nivel de ruido que provocaban las ruedas de acero y las herraduras de los animales.

Normalmente, tenían una longitud comprendida entre los 12 y los 25 cm y entre los 7 y los 10 cm de anchura, con una separación entre ellos de 3 mm, que se rellenaba con residuos bituminosos. De todos modos, aunque el nivel sonoro era inferior a los de piedra, se degradaban rápidamente a la intemperie y tras la aparición de los neumáticos se abandonaron.

Los ladrillos cerámicos utilizados como material de pavimentación se han estado utilizando durante los últimos 5000 años, desde Mesopotamia, habiéndose demostrado su aptitud para usos peatonales o de bajos requerimientos.

Los ladrillos cerámicos en pavimentación se colocaban sobre una capa de arena que también servía para rellenar las juntas, siendo su principal problema el rápido desgaste de su superficie, con la consiguiente reducción de su vida útil y de su resistencia al deslizamiento.

Por último, llegamos a los adoquines de hormigón, que comenzaron a fabricarse por primera vez, a finales del siglo XIX. Rápidamente se comprobó que proporcionaban una mayor uniformidad y unos costos más reducidos que los adoquines de piedra y los cerámicos.

Ha sido comprobado que su utilización puede ser la solución ideal en países donde el mantenimiento de carreteras es muy poco, debido a la escasez de fondos.

## **2.8. Características de pavimentos no convencionales.**

Responde al nombre de pavimento articulado y se basa en la pavimentación de calles con adoquines de hormigón contruidos especialmente para tal efecto, por lo que se presenta para el afirmado de superficies de tránsito de todo tipo y sometidos a las más diversas solicitaciones de carga, ofreciendo múltiples posibilidades de aplicación, distintos diseños superficiales, prolongando vida útil y escaso mantenimiento.

El pavimento consiste en una carpeta de adoquines asentados sobre arena y una base estabilizada granular. Su diseño tiene en cuenta la función que cumple la superficie de tránsito, las cargas que debe soportar, la forma de construcción, calidad de los materiales empleados y condiciones del suelo de fundación (subrasante). Los adoquines de hormigón se producen sin excepción en autómatas fijos que facilitan el llenado homogéneo de sus moldes y logran una intensa compactación del hormigón mediante vibrado y compactación simultánea, garantizando así sus características preponderantes. A saber:

Elevada resistencia a la compresión.

Constancia dimensional.

Impermeabilidad.

Superficie muy densa no degradable y moderadamente áspera.

Excelente fricción para el frenado.

El ensamble y las juntas a corta distancia, evitan que el pavimento se deteriore, fisurándose o quebrándose, por la acción de cargas accidentales y de temperaturas extremas, como por asentamientos en capas inferiores.

No tiene el inconveniente del deterioro que se produce en las curvas o por efecto del frenado y arranque en los cruces de calles, paradas de colectivos, etc., los que originan en este caso tensiones de corte por la combinación de fuerzas verticales (cargas) y horizontales (frenadas y arranques).

Por estar compuesto de piezas de dimensiones relativamente reducidas, la colocación del pavimento articulado resulta cómoda, práctica y sencilla.

Resulta sencilla la demarcación o la señalética vial, mediante la variación de color o de textura superficial de los elementos.

Elimina la influencia de factores de perturbación y demora en la construcción y habilitación de las calzadas tales como las interrupciones que se producen durante la construcción, principalmente en zonas urbanas debido a la existencia de un gran flujo vehicular.

Los adoquines se fabrican en una planta, lo que hace posible un desarrollo controlado de su producción, mediante la aplicación de técnicas depuradas en la preparación de las mezclas y procesos de elaboración y además, se asegura una producción continuada, al margen de problemas climáticos, especialmente en épocas de temperaturas extremas en ciertas regiones del país.

Es posible la remoción parcial o total del pavimento, rápidamente y sin rotura de los elementos, para permitir el paso de canalizaciones subterráneas, colocación de tanques o depósitos subterráneos, bases de máquinas etc.

## **2.9. Comportamiento del sistema del pavimento articulado (adoquín).**

Tienen el mismo comportamiento de un pavimento flexible; están constituidos por una capa de rodadura de adoquines en concreto, una capa de arena, la base y la subrasante. El trabajo que desempeñan las capas se asemeja a las funciones que cumplen cada una de ellas en un pavimento flexible. (pavimentos articulados,wordpress.com 2009).

Los pavimentos de adoquines no pueden considerarse rígidos, pues si bien se producen momentos de flexión locales en la extensión de cada adoquín, estos se anulan en la juntura con el adoquín vecino. Sin embargo, los adoquines no actúan independientemente. Existe una transmisión de esfuerzos a los adoquines vecinos por esfuerzo de corte. Este existiría

en la medida que no supere en magnitud al esfuerzo de fricción generado entre las paredes de los adoquines por la arena fuertemente comprimida entre ellas. Un análisis efectuado por el profesor J. Knapton concluyó que la distribución de presiones a través de distintos elementos que conforman el pavimento flexible, se distribuye en las diferentes capas que conforman a este. Por ende, los pavimentos de adoquines no son considerados rígidos ni tampoco flexibles, pues poseen una mezcla de efectos de los dos.

#### **2.10. Diseño del pavimento articulado, Norma IRAM 11656 (CONCRETEC).**

Estas piezas de pavimento prefabricadas CONCRETEC se rigen a la norma IRAM 11656 las cuales, deben cumplir con varios requisitos geométricos y resistencia, como: muestreo, forma, dimensiones, color, textura y resistencia a varios esfuerzos. A continuación se darán algunos valores de lo anterior mencionado.

Capa de rodamiento conformada por elementos uniformes macizos de hormigón, denominados adoquines, que se colocan en yuxtaposición adosados y que, debido al contacto lateral, a través del material de llenado de la junta, permite una transferencia de cargas por fricción desde el elemento que la recibe hacia todos sus adyacentes, trabajando solidariamente y con posibilidad de desmontaje individual.

Este tipo de pavimento se comporta como un pavimento flexible gozando simultáneamente de las cualidades del hormigón. El sistema de trabazón o encastre de los adoquines impide su desplazamiento horizontal en zonas de frenado o de curvas cerradas. La textura del pavimento conformado tiene características antiderrapantes, evitando el riesgo de deslizamiento de los vehículos sobre superficies húmedas, y es un limitador natural de la velocidad, siendo especialmente apto para zonas residenciales.

La posibilidad de desmontar o destrabar los adoquines individualmente, facilita las operaciones necesarias para la instalación de cualquier conexión subterránea, reutilizando los mismos adoquines.

#### **Agregados.**

En pilas de acopio separadas y sobre un sustrato firme, preferentemente pavimento de hormigón, evitando la alteración o contaminación de los agregados con otros materiales o sustratos.

### **Aditivos.**

En recipientes o envases contenedores, protegidos frente a acciones meteóricas o efectos que alteren sus características y/o propiedades.

Para la fabricación de bloques para mampostería y adoquines de hormigón, se requiere utilizar equipamiento específico para la producción de piezas premoldeadas de hormigón, de acuerdo con las siguientes características:

### **Dosificación de componentes de la mezcla de hormigón.**

Por medio de centrales de dosificación de materiales en peso -preferentemente- o volumen, dotados de mecanismos para el ajuste de parámetros de dosificación y correcciones por humedad de agregados. No se admiten procedimientos de dosificación manual en volumen de material cementicio y suministro de agua de amasado en la mezcla.

### **Mezclado.**

Por medio de equipamiento mecánico adecuado para la elaboración de mezclas de hormigón de bajo asentamiento y relación agua/cemento.

### **Moldeo y compactación.**

Mediante el empleo de equipos de alto desempeño, capaces de aplicar una acción de vibro compresión con accionamiento mecánico o hidráulico. El equipo será, preferente, de tipo estacionario, operado en forma automática por medio de un controlador lógico programable (CLP), o en forma semiautomática. Las máquinas de tipo ‘ponedoras’ (también denominadas ‘egg-layers’ o ‘travellers’) solo serán admitidas en caso que reúnan las características técnicas mencionadas previamente, y que efectúen el moldeo y vibro compresión de la mezcla de hormigón con anterioridad a su depósito en la pista. En ningún caso se admitirán equipos con operación manual del proceso de compactación por vibración y/o compresión de la mezcla.

### **Curado.**

Podrá efectuarse en recintos de curado a vapor, cámaras de curado por nebulización de agua en estado líquido, o curado en pista con aspersores de agua, bajo condiciones de

temperatura, humedad y duración apropiadas. El proceso de curado será objeto de diseño y desarrollo particular de cada planta fabricante, con el fin de optimizar la calidad del producto fabricado, los procesos involucrados y el consumo de recursos.

#### **Arena para capa de asiento.**

Los espesores que se manejen para la capa de arena, deberán estar comprendidos de manera uniforme entre 3 y 5 cm, luego de vibrada y compactada la capa de rodamiento. La arena deberá ser gruesa con granulometría de 2 a 6 mm, sin más de 3 % de materia orgánica y arcilla, manteniendo un contenido de humedad uniforme. Una vez nivelada la arena no deberá pisarse, procediendo a colocar los adoquines a medida que se extiende la misma, de modo que ésta quede el menor tiempo posible descubierta.

#### **Arena para sellado de juntas.**

Una vez colocados los adoquines, separados entre sí por los espaciadores, se procederá con la compactación originando un sellado de juntas entre las unidades de abajo hacia arriba, para luego completarse con arena fina o de sello, por medio de barrido en la superficie. Esta arena debe ser lo más fina y seca posible, para lograr el llenado total de la junta confinando lateralmente los adoquines y transmitir cargas verticales entre sí. Deberán estar libres de contaminantes o sales solubles, con el sentido de minimizar la presencia de eflorescencias. Cuando un exceso de humedad en el ambiente, no permita el correcto sellado, será necesario un secado intencional y acelerado de la arena, para luego mantenerla acopiada y tapada.

#### **2.10.1. Adoquines de hormigón.**

Los adoquines serán de hormigón pre moldeado de alta resistencia, elaborados en fábrica, mediante dosificación de materiales y curado realizados en forma racional. Los adoquines de hormigón estarán en un todo de acuerdo con la Norma IRAM 11656. Deberán ser identificados con los siguientes datos:

Identificación de fabricante y Fábrica

Referencia al cumplimiento de la Norma IRAM 11656.

Identificación de las dimensiones nominales

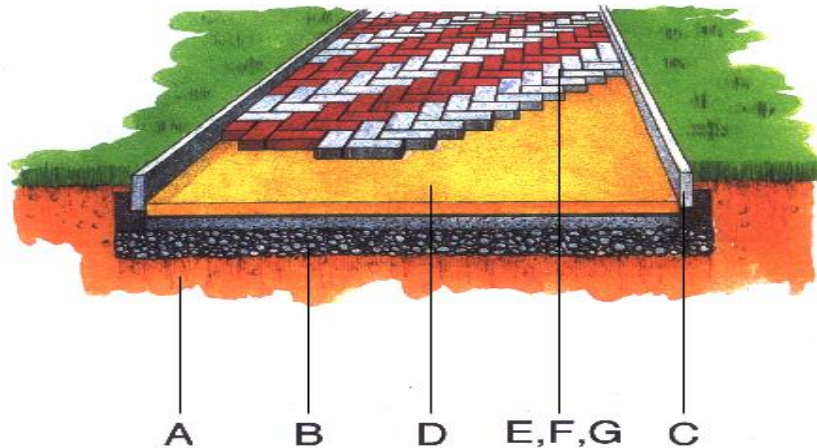
Fecha de fabricación.

Fecha de recepción

Marca y logotipo de adoquín.

### 2.10.2. Ejecución del pavimento articulado (adoquín).

Figura 12. Las distintas etapas de construcción de un pavimento con adoquín.



Fuente: Pavimentos de adoquines de hormigón (IRAM 11656).

**A.** Preparación de subrasante

**B.** Preparación de sub-base y/o base

**C.** Ejecución de los bordes de confinamiento

**D.** Extendido y nivelación de la capa de arena de asiento

**E. , F y G.** Colocación de los adoquines.

Compactación y vibrado inicial, relleno de las juntas con arena de sello.

Compactación y vibrado final, barrido de arena de sello sobrante.

#### **Operaciones previas.**

Comprenderá el tipo de compactación o estabilización de suelo, teniendo en cuenta los servicios urbanos, utilizando métodos conocidos para la correcta limpieza del terreno, Excavación y Preparación de Subrasante, que servirá para el asentamiento de la estructura del pavimento a construir, sin dejar de respetar gálidos y pendientes definidos en proyecto.

### **Subrasante, subbase y base.**

Es la capa de material colocada entre la subrasante y la capa de rodamiento, que le da mayor espesor y capacidad estructural al pavimento. Puede ser simple o estar compuesta por dos o más capas de materiales diferentes, en cuyo caso se llama sub-base a la capa inferior, a la que se permite más tolerancia y base a la capa superior.

La base debe tener una densidad uniforme en toda su extensión y profundidad, y este requisito se observará de manera especial en las zonas cercanas a las estructuras de confinamiento, sumideros, cajas de inspección, etc., donde el proceso de compactación es más difícil de llevar a cabo.

La preparación de estas etapas se realiza de la misma manera que para un pavimento de hormigón continuo, teniendo en cuenta las especificaciones técnicas más usuales para cumplir espesores, condiciones de granulometría, plasticidad y valor soporte de los agregados.

Deberán tener una estructura cerrada, para no permitir que los granos de arena migren a ésta durante el uso del pavimento.

El mismo criterio sería adoptado, para cumplir las funciones básicas habituales de membranas geotextiles, convenientemente colocadas entre base y sub-base con el fin de distribuir cargas concentradas en forma más efectiva o en aquellos casos, donde la repetición de cargas elevadas sea un elemento fundamental en el diseño.

Las bases, tienen por objeto absorber las presiones que reciben de las capas superficiales y transmitir las uniformemente al terreno de fundación, siendo su espesor, resultado de analizar el tipo de clima, suelo, tráfico previsto, drenaje, etc.

La terminación de la superficie, deberá quedar perfectamente perfilada con una planialtimetría ajustada a los perfiles transversales y longitudinales requeridos para la rasante del proyecto, con una discrepancia de +/- 10 mm. (norma IRAM 11657), medida con regla de 3 m.

Se deberán respetar las pendientes mínimas de 1:40 en la dirección transversal y 1:80 en la dirección longitudinal. (norma IRAM 11657)



Para conformar la caja se deberá tener en cuenta:

Los adoquines, luego de la compactación final, deben quedar como mínimo 5 a 10 mm. por encima de los bordes de los confinamientos, cordón cuneta, marcos de tapas de registro, sumideros, etc.

El espesor del adoquín (8 cm o 6 cm, el que corresponda de acuerdo al tipo de proyecto)

El espesor de la cama de arena compactada (3 cm.).

### **Bordes de Confinamiento.**

Los pavimentos intertrabados de adoquines de hormigón precisan bordes que los confine lateralmente con el fin de evitar desplazamientos de los adoquines, aberturas excesivas de las juntas o pérdida de trabazón entre ellos.

Los confinamientos generalmente se materializan por los cordones cuneta, vigas de borde, bordes de losas de hormigón, cunetas de hormigón, perfilería metálica, etc.

En los casos de existencia de cámaras de inspección, sumideros y otros servicios, se deberá materializar un marco de hormigón rodeando las bocas de cámaras. Estos marcos de hormigón se denominan confinamientos internos.

Todos los elementos de hormigón tendrán la resistencia especificada para los cordones cuneta.

Previa a la colocación de los adoquines deberán estar ejecutados todos los confinamientos.

### **Extendido y nivelación de la capa de arena de asiento.**

El objetivo básico de esta capa es servir de base para la colocación de los adoquines y proveer material para el sellado de las juntas, en su parte inferior.

Debe extenderse y nivelarse en forma cuidadosa, con el fin de conseguir una capa de espesor uniforme, puesto que el pavimento solamente se compacta una vez que los adoquines se colocaron. Para ello se puede utilizar una regla de nivelación con guías longitudinales. No debe pisarse la arena una vez nivelada, por lo que la colocación de los adoquines se debe realizar desde la capa de rodamiento instalada.

Se debe considerar la colocación de la arena en un espesor suelto de 4 cm. , para que una vez compactada quede aproximadamente de 3 cm. de espesor.

### **Colocación de los adoquines.**

Los adoquines deben colocarse en seco sin ningún tipo de cementante entre las juntas y aproximadamente entre 1,5 a 2 cm. sobre la cota del proyecto, pues la compactación posterior llevará al pavimento al nivel de proyecto.

### **Compactación y vibrado.**

Una vez colocados los adoquines es necesario compactar el pavimento sin arena de sello, para ello se usará la placa vibradora especificada en 3.

### **Relleno de las juntas con arena (sellado)**

Esta operación es muy importante para garantizar un correcto comportamiento del pavimento. Se realiza extendiendo sobre el pavimento arena fina, definida en 2.2. que debe estar seca en el momento de su colocación.

Posteriormente, con una escoba dura o un cepillo se barre para que la arena penetre en los espacios entre adoquines a la vez que se realiza un vibrado final que asegura un mejor llenado de las juntas. Una vez que las juntas estén completamente llenas, la arena sobrante debe retirarse mediante un barrido y no por lavado con agua.

### **2.10.3. Ventajas del pavimento articulado (adoquín).**

Fácil y rápido colocado.

Mantenimiento simple y económico

Articulados, no se producen baches ni rajaduras

Es posible elaborar variados diseños arquitectónicos

No necesitan sellado de juntas

Rompen la monotonía de un pavimento plano

Variedad de colores y combinaciones

Alta resistencia para el uso peatonal o vehicular.

Alta resistencia a los agentes abrasivos y agresivos

Rápida renovación parcial

Reutilizables en su totalidad.

### 2.11. Especificaciones técnicas de los adoquines (CONCRETEC).

El Hormigón es el producto resultante de la mezcla de cemento, agregado fino (arena), agregado grueso (ripio), agua y en ocasiones aditivos de diferentes propiedades.

En el caso del hormigón premezclado a diferencia de los hormigones preparados in situ, todas las materias primas que han sido sometidas a un estricto control de calidad, garantizando su óptimo rendimiento y resistencia.

El hormigón premezclado de CONCRETEC es dosificado electrónicamente, mediante un sistema que permite prepararlo de acuerdo a las condiciones que su obra requiere, garantizando la homogeneidad de la mezcla y su resistencia a los esfuerzos de compresión.

Las losetas y adoquines de CONCRETEC son piezas fabricadas con hormigón simple, pueden tener varias formas y colores distintos. Son colocadas sobre una capa de arena compactada de forma que la unión entre las piezas conforme un pavimento articulado.

Tabla 3. Ficha técnica.

Producto	a	l	E	Peso (Kg/Pza.)	Rendimiento	Tipo de
	(cm)	(cm)	(cm)		(Pza./m <sup>2</sup> )	Hormigón
Doble S	12	24	10	6,90	32	210 Kg/cm <sup>2</sup>

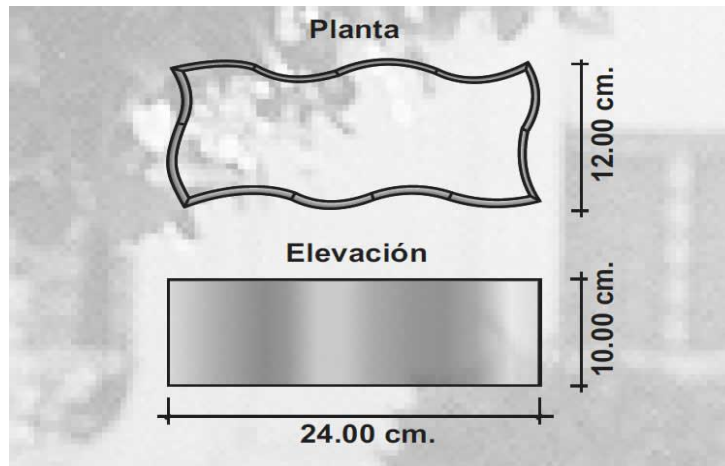
Fuente: Concreto y Tecnología (Concretec)

Tabla 4. Ficha técnica de la dosificación del adoquín.

Resistencia			Cemento kg	Arena m <sup>3</sup>	Grava m <sup>3</sup>	Agua Lts.	Cantidades
kg/cm <sup>2</sup>	PSI	Mpa	(cmt)	(ar)	(gr)	(promedio)	(cmt-ar-gr)
210	3000	20	350	0,56	0,84	180	1-2-3

Fuente: Concreto y Tecnología (Concretec).

Figura 13. Dimensiones del adoquín utilizado.



Fuente: Concreto y Tecnología (Concretec).

Figura 14. Adoquín doble "S"



Fuente: Concreto y Tecnología (Concretec).

### 2.11.1. Usos y Aplicaciones

El hormigón pre-mezclado de CONCRETEC es una excelente alternativa en la construcción de todo tipo de estructuras, a través de bombas de hormigón se optimiza su uso ahorra tiempo de ejecución de obra y alquiler de equipo adicional para la fabricación del mismo en obra.

La dosificación del hormigón se realiza por peso, siendo una planta especial para la fabricación de este producto, obteniendo de esta manera resultados en el producto de excelente calidad, además que se encuentra certificado con el sello de calidad internacional ISO 9001:2008 y el sello IBNORCA.

Un laboratorio especializado realiza de forma gratuita, un control de las resistencias del hormigón a la compresión simple a los 28 días, verificando de esta manera la calidad y el buen comportamiento estructural del producto.

### **2.12. Extracción del suelo y toma de muestras.**

El empleo de los diferentes métodos descritos en este proyecto, depende del tipo de muestras obtenidas, del tipo de ensayo y de las propiedades de ingeniería requeridas, de la fragilidad y sensibilidad del suelo, y de las condiciones climáticas. En todos los casos, el objeto primordial es preservar las condiciones propias de cada muestra.

Para la caracterización de este proyecto se extrajeron tres muestras en diferentes puntos tanto para la subbase como la subrasante, localizados en las diferentes calles en estudio; las muestras se extrajeron y se identificaron apropiadamente con membretes y marcas, antes de transportarlas.

Estas muestras se transportaron y conservaron debidamente en bolsas plásticas tratando de mantener las muestras inalteradas tomando en cuenta la norma (ASTM D4220) de la ABC, (Administradora Boliviana de Carreteras); estas muestras fueron extraídas con apoyo de herramientas como ser pala, picos, barrenos y cualquier herramienta de mano conveniente.

### **2.13. Análisis granulométrico (AASHTO T-27).**

Granulometría es la determinación de los porcentajes de grava, arena, limo y arcilla que se encuentra en cierta masa de suelo.

El método mecánico se usa en caso de que los suelos sean granulares lo que permite fácilmente determinar los porcentajes de grava y arena mediante el uso de un juego de tamices. Estos tamices con aberturas calibradas, 3", 2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8",

Nº4, Nº10, Nº40, y Nº200 que significa que una pulgada está dividida en 200 partes iguales, las cuales pertenecen a la serie de tamices de U.S. Bureau of Standard.

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

Este método de ensayo se utiliza para determinar la graduación de materiales propuestos para su uso como agregados o que están siendo utilizados como agregados. Los resultados se usan para determinar la conformidad de la distribución por tamaños de partículas con los requisitos aplicables de la especificación requerida y para proporcionar los datos necesarios para el control de la producción de varios productos de agregados y de mezclas que contengan agregados. Los datos también pueden ser útiles para desarrollar relaciones concernientes a la porosidad y al acomodo de partículas.

#### **2.14. Límites de Atterberg (LL. AASHTO T- 89, LP. T-90).**

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

Existen suelos que, al ser remoldeados, cambiando su contenido de agua si es necesario, adoptan una consistencia característica, que desde épocas antiguas se ha denominado plástica. Estos suelos han sido llamados arcillas, originalmente por los hombres dedicados a la cerámica; la palabra pasó a la mecánica de suelos, en épocas recientes, con idéntico significado. La plasticidad es, en este sentido, una propiedad tan evidente que ha servido antaño para clasificar suelos en forma puramente descriptiva.

En mecánica de suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.

### **2.15. Relación humedad – densidad, Compactación (AASHTO T – 180).**

Se entiende por compactación de los suelos el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos. Se distingue de la consolidación de los suelos en que, en este último proceso el peso específico del material crece gradualmente bajo la acción natural de sobrecargas impuestas que provocan expulsión de agua por un proceso de difusión; ambos procesos involucran disminución de volumen, por lo que en el fondo son equivalentes.

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

La estabilidad de una obra vial exige, entre otras cosas, que los terraplenes y las diferentes capas de rodamientos se hallen debidamente compactados.

A fin de que el material a compactarse alcance la mayor densidad posible en el terreno, deberá tener una humedad adecuada en el momento de la compactación. Esta humedad, previamente determinada en un laboratorio de suelos, se llama “humedad óptima” y la densidad obtenida se conoce con el nombre de “densidad máxima”.

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo, compactado en un molde normalizado, mediante un pisón de 4,5 Kg. en caída libre, desde una altura de 460 mm, con una energía específica de compactación de 2.67 J/cm<sup>3</sup> (27.2 kgf cm/cm<sup>3</sup>). En suelos que no permiten obtener una curva definida de relación humedad/densidad y que contengan menos de un 12% de partículas menores que 0,08 mm (ASTM N° 200), se debe determinar la densidad de acuerdo con el método para Determinar la Densidad Relativa en Suelos No Cohesivos.

### **2.16. Ensayo de la Relación de Soporte de California (CBR).**

El ensayo CBR (la ASTM denomina el ensayo simplemente un ensayo de relación de soporte) mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, pero de la aseveración anterior es evidente que este número no es constante para un suelo dado, sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo. De paso, es interesante comentar que el experimento puede hacerse en el terreno o en un suelo compactado.

El número CBR (o simplemente, CBR) se obtiene como la relación de la carga unitaria (en libras por pulgada cuadrada) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado.

### **2.17. Ensayo de resistencia a compresión probetas cúbicas (ASTM C39 – AASHTO T22)**

Se debe tener en cuenta en la interpretación del significado de los resultados de la resistencia a la compresión obtenida por medio de este ensayo, puesto que la resistencia no es una propiedad fundamental o intrínseca del concreto. Los valores obtenidos pueden depender del tamaño y la forma del espécimen, el tipo de mezcla, los procedimientos de mezclado, los métodos de muestreo, molde y fabricación y de la edad, temperatura y condiciones de humedad durante el curado.

Los resultados de este método de ensayo se usan como una base para el control de calidad de la proporción, mezclado y la colocación de concreto, determinación del cumplimiento de especificaciones, control para la evaluación de eficacia de aditivos y usos similares.



## **2.18. CBR de diseño.**

La metodología actual para diseño de pavimento por el método AASHTO, considera que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales constitutivos de la sección de una carretera es el parámetro denominado módulo resiliente.

En las obras viales la más utilizada además económica para la determinación de la capacidad portante de la fundación o Subrasante es el CBR (California Bearing Ratio) expresada en el ensayo según la AASHTO T-180; dentro de este marco se tomará los ensayos CBR como datos de cálculo.

### **2.18.1 Módulo de resiliencia.**

Los materiales que constituyen los pavimentos se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tráfico. Con el fin de tener en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman una estructura del pavimento, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales, se han realizado en el mundo varios trabajos experimentales, tanto en modelos a escala natural como en muestras probadas en el laboratorio, obteniéndose valiosa información sobre el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales.

Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suele denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la carga. Bajo carga móvil la deformación permanente se va acumulando y para ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. La muestra llega así a un estado tal que en toda la deformación es recuperable; en ese momento tiene un comportamiento resiliente. De aquí se desprende el concepto de módulo resiliente, el cual está definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable.

### **2.18.2. Correlaciones entre el % CBR y módulo de resiliencia.**

En nuestro medio por la falta de no existencia de experiencia, ni equipos para determinar el módulo resiliente se correlaciona el valor de laboratorio del CBR pudiendo utilizar las siguientes expresiones:

Para CBR < 10%

$$M_{R(\text{psi})} = 1500 * \text{CBR}$$

Para CBR 10% a 20%

$$M_{R(\text{psi})} = 3000 * \text{CBR}^{0.65}$$

Para CBR > 20%

$$M_{R(\text{psi})} = 4326 * \text{Ln CBR} + 241$$

Según el método AASHTO 2002 considera.

Un módulo de resiliencia con el CBR que rige; los datos obtenidos mediante la fórmula serán para todos los casos más afines a la propiedad de los suelos.

$$M_{R(\text{psi})} = 2555 * \text{CBR}^{0.64}$$

### **2.18.3 Periodo de diseño.**

El método toma dos variables para tener en cuenta: periodo de análisis y vida útil del pavimento. El periodo de análisis puede comprender varios periodos de la vida útil, el del pavimento original y de los distintos refuerzos de rehabilitación. La vida útil es el periodo inicial de diseño, de construcción y el momento en que este alcanza el mínimo grado serviciabilidad. Los periodos de análisis recomendados por la AASHTO se muestran en la tabla periodo de diseño en Anexos (Tabla A6-2).

### **2.18.4. Serviciabilidad.**

Se define la Serviciabilidad como la capacidad del pavimento para brindar la condición necesaria para proveer a los usuarios un manejo seguro y confortable en un determinado momento. En el procedimiento diseño AASHTO, la serviciabilidad está calificada en términos de clasificación de Serviciabilidad Presente (PSR). Se lo califica el PSR un grupo de usuarios que circula sobre el pavimento y lo califica de 0 a 5.

Antes de diseñar el pavimento se deben elegir los índices de servicio inicial y final. El índice de servicio inicial *po* depende del diseño y de la calidad de la construcción. En los

pavimentos flexibles estudiados por la AASHTO, el pavimento nuevo alcanzó un valor medio de  $po = 4,2$ .

El índice de servicio final  $pt$  representa al índice más bajo capaz de ser tolerado por el pavimento, antes de que sea imprescindible su rehabilitación mediante un refuerzo o una reconstrucción. El valor asumido depende de la importancia de la carretera y del criterio del proyectista; se sugiere para carreteras de mayor tránsito un valor de  $pt \geq 2,5$  y para carreteras de menor tránsito  $pt = 2,0$ .

#### **2.18.5. Pérdida del índice serviciabilidad.**

Los valores anteriormente descritos nos permiten determinar la disminución del índice de servicio, que representa una pérdida gradual de la calidad de servicio de la carretera, originada por el deterioro del pavimento. Por tanto:

$$\Delta PSI = po - pt$$

Donde:

$\Delta PSI$  = Diferencia entre los índices de servicio inicial y el final deseado.

$po$  = Índice de servicio inicial.

$pt$  = Índice de servicio final.

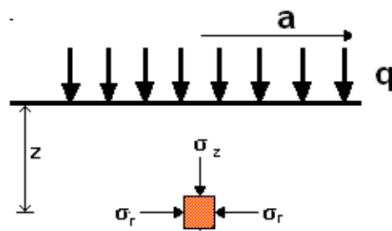
#### **2.19. Métodos de dimensionamiento, análisis elástico.**

La teoría del análisis elástico es el procedimiento más ampliamente utilizado para el estudio de pavimentos flexibles. El pavimento es representado como una sucesión de capas con propiedades elásticas y la distribución de esfuerzos a través del pavimento son calculadas en función de las magnitudes de la carga y su colocación, el espesor de las capas y sus propiedades. Antes de la llegada de las computadoras de alta velocidad en los años 60 se habían hecho pequeños progresos en el análisis de los sistemas de capas. No

obstante, desde hace tiempo unas variedades de soluciones elásticas han sido publicadas incluyendo un amplio número de programas.

Cuando una carga se aplica sobre un área circular, los valores críticos de esfuerzo, deformación y deflexión ocurren en el eje de simetría bajo el centro del área circular.

La carga aplicada a un pavimento por un neumático es similar a una placa flexible con radio “a” y presión de contacto uniforme “q”.



Los métodos mecanicistas representan una excelente opción a la hora de realizar diseños de elementos estructurales debido, entre otras cosas, a la precisión con la que se pueden simular las condiciones de carga, las propiedades de los materiales y las condiciones de apoyo.

Dependiendo de la naturaleza de la situación que se va a estudiar, la solución de los sistemas de ecuaciones que se generan de los modelos matemáticos del fenómeno suele ser compleja, siendo por ello los métodos numéricos de importancia vital para llegar a dichas soluciones.

En la aplicación de este proyecto se propone el uso del método de elementos finitos para auxiliar el dimensionado estructural de los pavimentos articulados (adoquín), tomando como muestra un tramo de la red vial que forma parte del sistema de transporte de la comunidad de San Lorenzo.

Al obtener el dimensionado de la estructura de pavimento basado en la información de tránsito, condiciones del suelo de fundación y el tipo de material empleado para el pavimentado de las calles, se realizará un análisis comparativo de estos dos métodos como ser el método mecanicista y elemento finito para así obtener un buen dimensionamiento del pavimento no convencional (adoquín).

## **2.20. Método mecanicista para pavimentos.**

### **AASHTO – 93**

La aplicación del Método AASHTO-72 se utilizó hasta mediados del año 1983. Ese año se determinó que aun cuando el procedimiento que se aplicaba alcanzaba sus objetivos básicos, se podían incorporar algunas actualizaciones a la fecha en el análisis y diseño de pavimentos. Por esta razón, el Subcomité de Diseño de Pavimentos (1984-1985) junto con un grupo de ingenieros consultores comenzó a revisar el "Procedimiento Provisional para el Diseño de Pavimentos AASHTO-72", y a finales de 1986 concluye su trabajo con la publicación del nuevo "Manual de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 86". Posteriormente, se realizó una nueva revisión en el año 1993, por lo cual hoy en día el método se conoce como Método AASHTO-93 (Corredor 2009).

La guía AASHTO-93 ha sido por muchos años la metodología de diseño aceptada en la mayoría de los países de América Latina. Esto se debe a que presenta ventajas tales como simplicidad, resultados adecuados y accesibilidad. Su simplicidad radica en que limita el diseño de la estructura de pavimentos al cálculo de los espesores para cada una de las capas, para ello es necesario conocer un pequeño número de parámetros. Es importante señalar que los resultados obtenidos por esta guía brindan espesores iniciales; sin embargo, solo proporcionan una buena aproximación de las dimensiones con los que deberá contar cada capa de la estructura.

Para comprender los Métodos mecanicistas para el análisis estructural y el diseño de pavimentos, es necesario conocer la esencia de dichos métodos, los cuales se ponen en énfasis en los conceptos involucrados, ya que en la definición de fórmulas matemáticas hay muchos coeficientes de ajuste los cuales no tienen un sentido físico, esto nos permite reflexionar sobre las limitaciones que se tienen en cuanto a llevar un modelo de campo a papel o en el mejor de los casos a un programa computacional.

Actualmente para el diseño de pavimentos el enfoque utilizado comprende los métodos empíricos, en los cuales el diseño de los espesores del pavimento es respaldado por propiedades físicas de los materiales y un índice de resistencia; en nuestro país comúnmente es usado el valor de CBR por sus siglas en inglés California Bearing Ratio, del módulo de Resiliencia el cual es un concepto mecanicista encontrado por correlación

con el valor de CBR, con los métodos empíricos como es el caso del método AASHTO 93; se tiene la incertidumbre de que las condiciones en las que se ha realizado el tramo de prueba, no son las mismas que las de nuestro país; debido a esto se necesita la introducción de grandes factores de seguridad, para poder brindar la confiabilidad necesaria, este enfoque está limitado por los tipos de suelos considerados los cuales cambian de sitio en sitio, los métodos de construcción son cada vez más modernos y las configuraciones vehiculares cambian.

### **2.20.1. Metodologías mecanicistas.**

Las metodologías mecanicistas buscan tener un enfoque puramente científico, con el fin de alcanzar un análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante las acciones del clima y el tránsito vehicular, conociendo las propiedades mecánicas de los materiales en campo o en laboratorio, para poder tener una correcta predicción del desempeño del pavimento, es decir, la evolución que se tiene en el tiempo en cuanto a los deterioros que se prevén que se presentarán, por lo que se aumenta la confiabilidad de los diseños, en cuanto a metodologías empíricas.

### **2.20.2. Ventajas y características del método mecanicista.**

El diseño ya no es solo para el espesor de la estructura.

Aproximación comprensiva incluyendo consideraciones estructurales y de los materiales.

Manejo mejorado de efectos climáticos y diseños de seguridad.

Funcionamiento basado en deterioros y calidad de la carretera.

Mejor caracterización de pavimentos existentes.

Consideraciones directas de drenaje y erosión de la subbase.

Mejor habilidad para manejar las características cambiantes del tránsito.

Capacidad para incorporar materiales pavimentados disponibles.

Capacidad de extrapolar de los estudios de campo y laboratorio.

### **2.20.3. Componentes de entrada al diseño mecanicista.**

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

La selección del diseño inicial consiste en una primera estimación de valores, es decir un diseño de prueba, para los parámetros de entrada, los cuales son enumerados a continuación.

Geometría de la estructura; los espesores de cada capa (base, sub-base, carpeta).

Propiedades mecánicas de los materiales: consisten en la introducción de módulos elásticos para cada una de esas capas, que serán módulos dinámicos o resilientes.

Tipo de clima del medio físico: definido por precipitación y temperatura, en el medio que atravesará la carretera.

Nivel de tránsito vehicular: definido ya sea en ejes equivalentes, o preferentemente a través de su correspondiente espectro de distribución de cargas.

### **2.20.4. Cálculo de respuestas estructurales.**

Definido el diseño inicial se procede al cálculo de lo que se va a llamar, las respuestas estructurales en la sección estructural del pavimento. Estas respuestas estructurales consisten en conocer la distribución de esfuerzos ( $\sigma$ ), deformaciones unitarias ( $\epsilon$ ), y deflexiones ( $\delta$ ). El cálculo se realiza básicamente considerando al pavimento como un medio multicapas en donde el comportamiento de los materiales se basa en la teoría de la elasticidad.

#### **2.20.4.1. Esfuerzos y deformaciones.**

Las distintas magnitudes de las cargas aplicadas en el pavimento durante su vida útil generan diferentes respuestas, tales como la deformación o daño. El pavimento reacciona a estas cargas según el espesor de sus capas y por los materiales que lo conforman. Esto provoca que el pavimento sea un material complejo cuyo diseño no puede generalizarse dentro de un país, ya que deben tomarse en cuenta diferentes factores, los cuales poseen gran variabilidad en el tiempo y el espacio. Por ejemplo, el tránsito promedio diario, el porcentaje de vehículos pesados, condiciones climáticas, entre otros. Cabe señalar que algunos factores son totalmente ajenos al control humano tales como el último mencionado.

Existen diversos indicadores del comportamiento de un pavimento asfáltico; sin embargo, generalmente se da mayor importancia a estos cuatro: deflexión superficial, deformación por tensión en la carpeta asfáltica, deformaciones por compresión en la subrasante y materiales granulares. La deflexión superficial y la máxima deformación a la tensión en el plano interior de la capa asfáltica están relacionadas con las grietas que se presentan en el concreto asfáltico debido a la fatiga. Los esfuerzos y deformaciones de compresión en la subrasante se relacionan con las deformaciones permanentes de la estructura de pavimentos.

#### **2.20.5. Procedimiento de diseño mecanicista, tránsito vehicular.**

Comúnmente para métodos empíricos se usa el concepto del número de ejes equivalentes o ESAL, los métodos mecanicistas consideran la circulación de camiones cargados en términos de ejes de espectro de carga. Se consideran espectros de carga para ejes simples, tándem, y trídem.

El enfoque de ESAL's ya no es más utilizado como un dato de entrada directa en el diseño. En algunos casos será pedido como un diseño preliminar o bien con propósito de una revisión. En algunos casos, los aspectos de carga serán convertidos en ESAL's internamente dentro del software como manera de hacer uso de modelos matemáticos previos que no los han convertido a una base de espectros de carga. Lo que se propone es



trabajar directamente con las configuraciones vehiculares y su correspondiente distribución de cargas por eje, a través del concepto de espectro de carga.

#### **2.20.5.1. Factores Equivalente de Carga**

El Road Test de la AASHTO 93 desarrolló un método que permite convertir el tránsito mixto a un número equivalente de ejes (EAL), los cuales poseen un peso de 18 000 lb (80 kN) de eje simple con rodado doble con neumáticos a la presión de 80lbs/pulg<sup>2</sup>. Para poder realizar esta conversión es necesario conocer los datos de factores equivalentes de carga, a través de los cuales se obtienen los factores camión.

El factor de equivalencia de carga, conocido por sus siglas en ingles LEF (Load Equivalence Factor), es el daño que los vehículos de carga transmiten a la estructura de pavimento representado en un número acumulado con respecto a un eje de referencia. Este factor tiene en cuenta el tipo estructura (hidráulico o asfáltico). El factor de equivalencia de carga se obtiene por medio de ecuaciones de regresión obtenidas de los resultados de los ensayos de la prueba AASHTO.

Asimismo, el factor equivalente de carga se define como la relación entre la pérdida de serviciabilidad que provoca una carga específica en un tipo de eje y la provocada por el eje de referencia de 18 000 lb.

#### **2.20.6. Beneficios que presentan los procedimientos de diseño mecanicistas.**

Permite una adecuada evaluación de las consecuencias en el desempeño del pavimento, producto de nuevas condiciones de carga (por ejemplo, modelación del daño por aplicación de cargas crecientes, por elevadas presiones de inflado en los neumáticos, por múltiples ejes y por otros factores que pueden ser modelados utilizando un procedimiento mecanicista).

Se puede hacer un mejor uso de los materiales disponibles (por ejemplo, se puede simular el comportamiento de materiales estabilizados, tanto en pavimentos rígidos como en flexibles, a fin de predecir el desempeño a futuro).

Facilita el desarrollo de procedimientos mejorados para evaluar los deterioros prematuros, a fin de analizar por qué algunos pavimentos exceden sus expectativas de diseño.

Los efectos por envejecimiento pueden incluirse en las estimaciones del desempeño (por ejemplo, el endurecimiento del asfalto debido al paso del tiempo, el cual puede influir en el ahuellamiento y en la generación de grietas por fatiga).

Los efectos estacionales, tales como el debilitamiento del pavimento producido por los deshielos, pueden ser incluidos en la estimación del desempeño.

Las consecuencias de la erosión de la subbase bajo pavimento rígido pueden ser evaluadas.

Permite el desarrollo de mejores metodologías para la evaluación de los beneficios a largo plazo que conlleva la dotación de drenajes mejorados a la vía.

Desde el punto de vista del diseño, aumenta la confiabilidad, permite predecir modos de falla específicos (los cuales pueden ser minimizados), evaluar de mejor manera el impacto de nuevos niveles y condiciones de carga, minimizar fallas prematuras, mejorar los diseños para rehabilitación de pavimentos e introducir adecuadamente variaciones diarias, estacionales y anuales en los materiales, el clima y el tránsito en el proceso de diseño.

## **2.21. Dimensionamiento de los espesores (método mecanicista).**

El método mecanicista consiste en determinar los espesores necesarios de pavimentos, diseñados según el método AASHTO de acuerdo a la última versión de 1993, utilizando variables de tránsito y capacidad de soporte del suelo de fundación.

Los parámetros de diseño AASHTO corresponden a aquellos para la realidad Boliviana; las estructuras de pavimento diseñadas por el método AASTHO, serán luego analizadas mediante un modelo mecanicista, el cual utiliza la herramienta computacional AASHTO 93 (AASHTO (1993) por Luis Vásquez para el diseño de pavimentos).

### **2.21.1. Módulo elástico del pavimento.**

Es un parámetro que representa la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tienen las losas de hormigón del pavimento, es un valor que representa la relación entre la tensión y la deformación. Las deflexiones, curvaturas y tensiones están directamente relacionadas con el módulo elástico del hormigón.

$$E_c = 57000 (f_c)^{0.5}$$

Donde:

$E_c$  = Módulo elástico de hormigón (psi)

$f_c$  = Resistencia a la compresión simple del Hormigón (psi)

### 2.21.2. Módulo resiliente de la subrasante.

Es una medida de la rigidez del suelo de subrasante, los materiales de la subrasante se caracterizan mediante el módulo resiliente o elástico.

$$MR_{(PSI)} = 2555 * CBR^{0,64} \quad (\text{AASHTO 2002})$$

### 2.21.3. Determinación del número estructural (SN) para pavimentos.

El diseño estructural de pavimentos articulados según el método está basado en la determinación del número estructural “SN” que debe soportar el nivel de carga exigido por el tipo de tráfico.

El método de diseño de la AASHTO para la determinación del número estructural requerido se lo realiza con la siguiente formula de diseño:

$$\text{Log } W_{18} = Z_R \cdot s_0 + 9.36 \cdot \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log} \frac{(\Delta PSI)}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \text{Log } M_R - 8.07$$

Donde:

$W_{18}$  = Tráfico equivalente o ESAL's.

$Z_R$  = Factor de desviación normal para un nivel de confiabilidad R

$s_0$  = Desviación estándar

$\Delta PSI$  = Diferencia entre los índices de servicio inicial y el final deseado

$M_R$  = Módulo de resiliencia efectivo de la Subrasante

$SN$  = Número estructural.

También se determina SN a través de ábacos de la figura ubicada en anexos (Abaco A6-1), que es mucho más rápido, pero menos preciso.

#### 2.21.4. Determinación de espesores por capa.

La estructura del pavimento flexible está formada por un sistema de varias capas, por lo tanto, debe dimensionarse cada una de ellas considerando sus características mecánicas y físicas propias.

Una vez determinado el Número Estructural  $SN$  para la sección estructural del pavimento, se requiere determinar una sección multicapa, que en conjunto provea una suficiente capacidad de soporte, equivalente al número estructural de diseño. Para este fin se utiliza la siguiente ecuación que permite obtener los espesores de la capa de rodamiento o carpeta, de la capa base y de la sub-base:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3$$

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN_1^* = a_1 D_1 > SN_1$$

$$D_2^* = \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 m_2}$$

$$SN_1^* + SN_2 \geq SN_2$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

$$SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* \geq SN \quad \text{Verification.}$$

$a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ : Coeficientes estructurales de capa de carpeta, base y sub-base respectivamente.

$D_1$ ,  $D_2$  y  $D_3$ : Espesor de la carpeta, base y sub-base respectivamente, en pulgadas.

$m_2$  y  $m_3$ : Coeficientes de drenaje para base y sub-base, respectivamente; el coeficiente depende del drenaje que se determina de acuerdo al tiempo que tarda el agua en ser evacuada del pavimento y el porcentaje de tiempo durante el cual el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación en el transcurso del año. Dicho porcentaje depende de la precipitación media anual y de las condiciones de drenaje; AASTHO define cinco capacidades de drenaje que se muestran en la tabla en anexos (Tabla A6-6)

### 2.21.5. Coeficientes estructurales.

Los coeficientes estructurales de la carpeta asfáltica ( $a_1$ ), de la capa base ( $a_2$ ) y de la subbase ( $a_3$ ), se obtendrá utilizando los valores del módulo de resiliencia mediante los ábacos correspondientes a cada una de ellas.

Los coeficientes de capa  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  se obtienen utilizando las correlaciones de valores de diferentes pruebas de laboratorio: Módulo Resiliente, Texas Triaxial, Valor R y CBR, tal como se muestra en los ábacos en Anexos (Ábacos A6-2, A6-4 y A6-5).

### 2.22. Parámetros de diseño.

Para los materiales de subbase y base se recomiendan los espesores mínimos que aparecen en la siguiente tabla:

Tabla 5. Espesores mínimos constructivos para diferentes materiales de base

<b>Material</b>	<b>CBR% de la subrasante o capa inferior</b>	<b>Espesor mínimo, mm</b>	<b>CBR % de la subrasante o capa inferior</b>	<b>Espesor mínimo, mm</b>
Granular para subbase	$\leq 6$	200	$\geq 6$	150
Granular para base	$\leq 6$	150	$\geq 6$	100

Fuente: Guía para diseño de pavimentos, AASHTO 1993. (Ing. José R. Harris Q.)

La tabla que se presenta a continuación sugiere algunos espesores mínimos para capas de rodamientos y bases, en función de los valores de cargas equivalentes en el periodo de diseño.

Tabla 6. Espesores mínimos, concreto asfáltico y base, en función al tránsito.

<b>Número de ESALs</b>	<b>Concreto asfáltico</b>	<b>Base granular</b>
menos de 50.000	2.5 cm	10 cm
50.000 - 15.000	5.0 cm	10 cm
150.000 - 500.000	6.5 cm	10 cm
500.000 - 2,000.000	7.5 cm	15 cm
2,000.000 - 7,000.000	9.0 cm	15 cm
mas de 7,000.000	10.0 cm	15 cm

Fuente: Guía de diseño AASTHO 93.

Los adoquines deben cumplir los requisitos establecidos en la norma IRAM 11656 (CONCRETEC), diseño de pavimentos articulados. Su espesor será previsto en los documentos del proyecto; sin embargo, a continuación daremos como referencia algunos parámetros en cuanto al material y pavimento.

#### **2.22.1. Forma de los adoquines.**

Con respecto a la influencia de la forma de los adoquines en la capacidad resistente del pavimento, existe una fuerte controversia entre dos escuelas, las que pueden ser llamadas “Australiana” por un lado y “Británica” por el otro. La primera, apoyándose en diversas experiencias de tráfico acelerado, asegura que los adoquines dentados con calce geométrico en sus cuatro costados proveen una mayor distribución de cargas. La segunda escuela considera que los adoquines dentados no son mejores que otros y que pavimentos de comportamiento exitoso, construidos con bordes suaves o rectos, son una prueba de ello. Con el estado actual del conocimiento no es posible asegurar cual alternativa es la más correcta; sin embargo, las extensas investigaciones realizadas en Australia y Sudáfrica con pavimentos bajo tráfico dan mayor fuerza a los argumentos de estos investigadores.

#### **2.22.2. Espesor de los adoquines**

El espesor es definido como la dimensión en dirección perpendicular a la cara de desgaste, igual a la distancia entre la cara de desgaste y la cara de apoyo. Los diversos ensayos de tráfico acelerado efectuados hasta el momento son coincidentes en señalar que las deformaciones permanentes en el pavimento son considerablemente menores con adoquines de 80 mm.

#### **2.22.3. Resistencia Mecánica**

La resistencia a compresión de los adoquines ha demostrado no tener influencia en el comportamiento de los pavimentos baja carga vehicular, dentro de un rango de 250 a 550 kg/cm<sup>2</sup>.

#### **2.22.4. Juntas entre adoquines.**

El ancho de las juntas y el material de sello tienen un importante rol en la transferencia de esfuerzos entre adoquines. El rango de variación del ancho de juntas, dentro del cual la

respuesta estructural del pavimento es óptima está comprendido entre los 2 y 5 mm. Con anchos menores a 2 mm, muy difíciles de conseguir aun en una construcción muy cuidadosa, el material de sello no puede llenar completamente los espacios produciéndose una pobre transferencia de carga. Si, en cambio, el ancho de junta sobrepasa los 5 mm se elimina el efecto de borde que confiere una mayor rigidez al material de junta y también la transferencia de carga decrece. La humedad de la arena de sello también influye en la capacidad de transmitir esfuerzos de los adoquines, recomendándose que durante la colocación esta no sea superior a un 2%.

#### **2.22.4. Límites de la deformación.**

Tanto los pavimentos de adoquines como los de asfalto presentan una deformación bajo tráfico no reversible, que debería ser controlada para asegurar que el pavimento mantenga características aceptables. Para pavimentos de adoquines de hormigón se tienen en cuenta diferentes consideraciones según el país de origen. Así por ejemplo en los Países Bajos la profundidad máxima de rodadura recomendada como límite de utilidad es de 25 mm y su límite estructural de 35 mm, aunque, estas especificaciones son difíciles de aceptar en otros lugares. En general es recomendable que la deformación final no sea mayor de 15 mm en vías urbanas y de 15 a 20 mm en aplicaciones industriales o rurales. En conjunto el control de la deformación representa uno de los criterios principales de diseño para los pavimentos de adoquines.

#### **2.23. Método elementos finitos para pavimentos.**

El uso de las teorías de placas y capas elásticas ignora la naturaleza discontinua de los pavimentos de adoquines, pero asume que pueden ser modelados en términos de una capa elástica continua equivalente cuyas propiedades pueden ser determinados por el test de carga con placa, estudio del tráfico acelerado o por los fallos de peso en el deflector.

Una alternativa es utilizar las técnicas de los elementos finitos para los pavimentos de adoquines, definiéndolos como una superficie articulada, sabiendo las cargas o la incidencia de los desplazamientos en las juntas entre unidades vecinas.

Este tipo de estudios han sido realizados en Japón y Países Bajos, demostrando que el análisis por elementos finitos es capaz de expresar el comportamiento observado en los

pavimentos de adoquines según la relación carga/flecha con más precisión que la teoría de las capas elásticas.

Cada capa en una sección transversal del pavimento, se supone que se extiende hasta el infinito en la dirección horizontal, y la última capa se supone que es infinitamente profunda. Todas las capas del pavimento se supone que están plenamente ligadas para que no se produzca deslizamiento, debido a la carga aplicada. Se calculan los desplazamientos, presiones y deformaciones, producidas por la carga a través de la rueda. (Leonardo Flores. Evaluación estructural de pavimentos flexibles)

Actualmente se ha venido desarrollando una nueva metodología para el estudio y análisis de pavimentos la cual emplea programas de elementos finitos para la determinación de esfuerzos y deformaciones.

Estos programas emplean ecuaciones constitutivas para el cálculo de esfuerzos y deformaciones las cuales suponen que el material es un continuo (no se tiene en cuenta el comportamiento individual de los componentes del material, sino su comportamiento global a nivel macro mecánico).

Pero en general, los programas de elementos finitos son mejores para intentar reproducir el comportamiento de los materiales que conforman un pavimento. Solo es necesario el desarrollo de ecuaciones constitutivas que predigan lo más cercano posible el comportamiento de cada uno de los materiales que conforman estas estructuras.

### **2.23.1. Ecuación fundamental de los elementos finitos en pavimentos.**

En la actualidad existen diferentes softwares que permiten realizar el diseño de estructuras de pavimento a partir de la teoría de elementos finitos, mecánica del medio continuo y métodos de análisis aproximados. En la mayoría de los análisis de diseño se supone que el material que constituye las capas de la estructura de pavimento trabaja en el rango elástico, es homogéneo, isotrópico y que las capas se adhieren perfectamente entre sí, lo cual en la realidad es imposible lograr.

Los pavimentos son estructuras constituidas por un conjunto de capas superpuestas, las cuales se diseñan y construyen para soportar los esfuerzos y deformaciones que les generan las cargas del flujo vehicular.



Para diseñar las estructuras de pavimento se emplean diferentes herramientas, entre las cuales se pueden enumerar los programas de elementos finitos, que están basados en la creación de un modelo bidimensional, el cual divide la región de estudio en triángulos de lados rectos, donde los vértices son los nodos y cada triángulo formado por tres nodos y tres lados, se llama elemento. La solución de los problemas bidimensionales está resuelta como un esfuerzo plano y una deformación unitaria plana, la cual se basa en la Ley de Hooke (ecuación N. 1), con sus tres casos:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{W}{E} \rho \delta_{ij} \quad \text{Ecuación N. 1}$$

Caso N.1

El modelo es lineal, con módulo de elasticidad E y la relación de Poisson  $\nu$  constantes, siendo estos los únicos parámetros del modelo.

Caso N.2

El modelo no es lineal y el módulo de elasticidad E y la relación de Poisson  $\nu$  son función de los invariantes p y q que tiene el modelo de Boyce, el cual es:

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad \text{Ecuación N. 2}$$

$$\nu = \frac{3K - 2G}{GK + 2G} \quad \text{Ecuación N. 3}$$

$$K = K_a \left( \frac{P_t}{P_a} \right)^{1-n} \left[ 1 - \frac{(1-n)k_a}{6G_a} \left( \frac{q}{P_t} \right)^2 \right]^{-1}$$

$$G = G_a \left( \frac{P_t}{P_a} \right)^{1+n} \quad Y \quad P_t = P_0 + P, \quad \text{Ecuación N. 4}$$

Donde:

$$P_0 = \gamma_i b_i$$

### Caso N.3

El modelo es no lineal,  $\nu$  es constante y  $E$  está determinado de la siguiente forma:

$$E = E_0 + \frac{E_1 + P'_0}{\rho\alpha},$$

$$\text{Donde: } P'_0 = P_0 - X^u \quad \text{Ecuación N.5}$$

y  $u$  es la presión intersticial y  $x$  es el grado de saturación del suelo.

Para las estructuras de pavimento el estado inicial de esfuerzos y deformaciones es el debido al peso propio de los materiales y se determina como aparece en la ecuación N. 6 y los esfuerzos totales debido a los invariantes  $p$  y  $q$  como está en las ecuaciones N. 7, 8, 9 y 10.

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{zz} = P_0 \quad \text{Ecuación N.6}$$

Donde:

$$p_0 = \sum_i \gamma_i h_i$$

$$P = \frac{1}{3}(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}) \quad \text{Ecuación N.7}$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{zz} \quad \text{Ecuación N.8}$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2 + (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_w)^2 + 6 * \varepsilon_{rz}^2 \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación N.9}$$

$$\varepsilon_q = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[ (\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta})^2 + (\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + 6 * \varepsilon_{rz}^2 \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación N.10}$$

#### 2.23.2. Análisis de elementos finitos para un problema de pavimentos.

Método de análisis numérico que permite obtener soluciones aproximadas en una amplia variedad de problemas de ingeniería.

El método se usa para dividir un medio continuo (por ejemplo, el volumen de un pavimento) en un gran número de pequeños volúmenes discretos con el fin de obtener una

solución numérica aproximada para cada volumen, en lugar de una solución exacta para todo el volumen.

### 2.23.2.1. Discretizar el medio de interés.

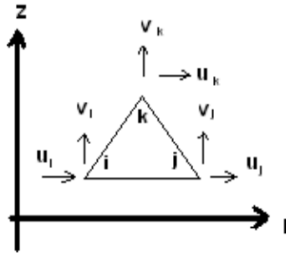
El medio pavimento-subrasante se divide en un número de elementos de formas geométricas simples, denominados elementos finitos, con las cargas de las ruedas en la parte superior.

### 2.23.2.2. Determinar las características de cada elemento.

Se asignan nodos a cada elemento y se escoge una función para interpolar la variación de la variable sobre el elemento discreto.

A partir de los elementos y de sus funciones de interpolación, se desarrolla una expresión matricial (matriz elemental) para relacionar las fuerzas con los desplazamientos en las esquinas de cada elemento.

Determinar las características de cada elemento (cont.).

$$\begin{bmatrix} H_i \\ H_j \\ H_k \\ V_i \\ V_j \\ V_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{14} & k_{24} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{15} & k_{25} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{16} & k_{26} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ v_i \\ v_j \\ v_k \end{bmatrix} \quad o \{f\} = [k]\{v_i\}$$


$k_{11}$  es la fuerza horizontal en el nodo “i” causada por un desplazamiento (virtual) de 1 en el nodo “i”,  $k_{12}$  es la fuerza horizontal causada por un desplazamiento horizontal de 1 en el nodo “j”, etc.

El conjunto de ecuaciones algebraicas es resuelto mediante un método matricial adecuado a través de un programa de cómputo que provee los desplazamientos en todos los nodos y determinando, a partir de ellos, los esfuerzos y deformaciones en los elementos, así como sus direcciones.

## 2.24. Dimensionamiento de los espesores (Método de Elementos Finitos).

El programa AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL ANALISIS PROFESSIONAL 2016, es un programa que hace uso de un método matricial de resolución de sistema de múltiples grados de libertad relacionados a la matriz de esfuerzos con la matriz de desplazamiento de la estructura por medio de una matriz K.

El diseño para ser modelado con elemento finito es posible obtenerlo con el programa AASTHO 93.

### 2.24.1. El peso específico del material.

Según el material de suelos que presenta el proyecto que está entre arcilla, limo, grava y arena en su respectiva clasificación ya presentada en la tabla 7.

Tabla 7. Pesos específicos de materiales (kg/cm<sup>3</sup>).

<b>Tierra, etc., excavada.</b>	<b>Peso específico</b>
Arcilla seca, suelta	1000 - 1500
Arcilla seca, compactada	1400 - 1800
Arcilla húmeda, plástica	1600 - 2000
Arcilla y grava seca, suelta	1600 - 2100
<b>Arcilla y grava seca, compactada</b>	<b>2000 - 2300</b>
Tierra seca, suelta	1000 - 1600
Tierra seca, compactada	1200 - 2000
Tierra húmeda, suelta	1000 - 1400
Tierra húmeda, compactada	1500 - 2200
Tierra, fango, fluido	1730

Fuente: Auxiliares instituto chileno del acero.

### 2.24.2. Carga aplicada al pavimento.

Para el método AASHTO los pavimentos se diseñan para que resistan una determinada cantidad de cargas, estas cargas son producidas por una diversidad de vehículos, de diferentes pesos y cantidad de ejes. Ante esta variedad y a efectos de cálculo, el método propone transformar en número de ejes equivalentes de 80 KN o 18 Kips.

### 2.24.3. Módulo de elasticidad.

Para el caso de limos y arcillas plásticas, en el ámbito de profundidades de transmisión de tensiones en profundidad por el bulbo de presiones del terreno, considerando el caso más desfavorable como si solo existiera este, se tomará como referencia a suelos medios como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Valores orientativos de NSPT, resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad de suelos

Tipo de suelo	NSPT	$q_u$ (KN/m <sup>2</sup> )	E (MN/m <sup>2</sup> )
Suelos muy flojos o muy blandos	< 10	0-80	< 8
Suelos flojos o blandos	10-25	80-150	8-40
Suelos medios	25-50	150-300	40-100
Suelos compactados o duros	50-Rechazo	300-500	100-500
Rocas blandas	Rechazo	500-5000	500-8000
Rocas duras	Rechazo	5000-40000	8000-15000
Rocas muy duras	Rechazo	>400000	> 15000

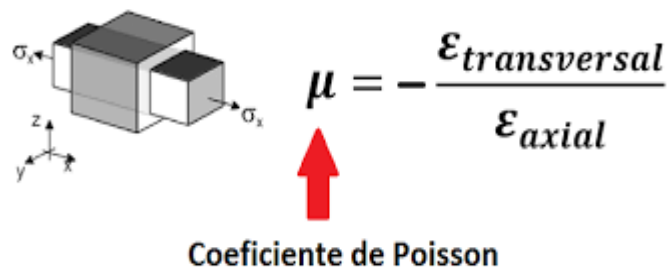
Figura: Extraída del documento Básico de Geotécnia del Código Técnico de la Edificación (DB CTE)

### 2.24.4. El coeficiente de Poisson.

El coeficiente de Poisson es otra característica que se debe definir al estudiar la compresión ya que se define como una constante elástica, que relaciona la deformación transversal entre la deformación axial. Según la figura 15, es un grado de estrechamiento al aplicar una fuerza.

Se considera de la tabla de Poisson el coeficiente para arcilla con arena mostrada en la tabla 9, generalmente se toma un valor medio de 0,3 para ingresar al programa.

Figura 15. Coeficiente de Poisson.



Fuente: Instituto tecnológico de Costa Rica.

Tabla 9. Valores aproximados de coeficiente de Poisson para distintos tipos de suelos.

<b>Tipo de suelos</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>
Arena suelta	0.1 - 0.3
Arena densa	0.3 - 0.4
Limo	0.2 - 0.4
Arcilla saturada	0.5
Arcilla parcialmente saturada	0.3 - 0.4
Arcilla con arena	0.2 - 0.4

Fuente: Ing. Carlos Enrique Villarroel “Asentamientos Mediante MEF”

(Geología y geotecnia, parametrización de suelos).

Los parámetros para este método serán iguales al del método mecanicista ya que contempla un solo pavimento que será diseñado con material no convencional como es el adoquín; la determinación de los espesores por este método se basará principalmente en los esquemas, descripciones de sus tensiones máximas y deformación del paquete estructural que presente en el programa AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL.

Para este programa computacional es necesario modelar otro programa o forma de cálculo de los espesores del pavimento, para así poder ingresar al programa AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL.

Es necesario varias modelaciones para poder obtener buenos espesores que se aproximen a los solicitados para estos pavimentos con adoquines.

Se considera los esquemas que presentará el programa, esquemas de los desplazamientos o asentamientos los cuales no deben pasar los apoyos lineales ubicados en el borde inferior de la estructura del pavimento, verificar las deformaciones y sobre todo las tensiones máximas que presenten el pavimento con el cálculo del programa y que estos deben ser próximos al cálculo inicial.

### **2.25. Comparación de métodos de dimensionamiento.**

La utilización de estos métodos busca tener un enfoque permanente científico, y así alcanzar un análisis completo de los métodos mecanicista y elementos finitos en el

dimensionamiento de los pavimentos articulados (adoquines) ante las acciones del tránsito vehicular.

El análisis comparativo de estos dos métodos como ser el método mecanicista y el método de los elementos finitos conlleva un dimensionamiento de pavimento articulado (adoquín), un cálculo de lo que se va llamar, las respuestas estructurales en la sección estructural del pavimento.

Estas respuestas estructurales consisten en conocer mediante los dos métodos ya mencionados, la distribución de esfuerzos ( $\sigma$ ), deformaciones ( $\epsilon$ ) y resistencia de los materiales; el cálculo se basa en la teoría de la elasticidad.

Este análisis comparativo se basará en los resultados obtenidos para cada uno de los métodos elásticos y definir cuál es el más conveniente para el área de estudio de aplicación realizado en las calles urbanas del municipio de San Lorenzo.

#### **2.26. Aplicabilidad en nuestro medio.**

En Bolivia, las calles de las áreas urbanas tienen las siguientes características:

Las aceras son estrechas, están en mal estado y, en muchos casos, solo existen los cordones.

Las calzadas son amplias, sobre todo, fuera de los centros históricos.

Existe problemas en la señalización vertical y horizontal.

No existe infraestructura destinada a los ciclistas como las ciclo vías o al transporte público como carriles exclusivos, paradas para buses, etc.

No existen lugares claramente establecidos para el estacionamiento.

Las vías carecen de identidad pues no están diseñadas en función de las condiciones locales y necesidades específicas. Por ejemplo, la acera no es más amplia, aunque esté cerca de una escuela, para así garantizar la seguridad de los alumnos; no existen áreas de estacionamiento, aunque se trate de un lugar comercial.

La principal consecuencia de esta falta de organización del espacio público es la mezcla de diferentes usuarios en las calzadas, pues los vehículos estacionados o en circulación, se mezclan con los peatones, bicicletas y generan caos.

El dimensionamiento de las vías se realiza en función a los objetivos globales de la ciudad; por ejemplo, beneficiar a los peatones, y a los objetivos del área de intervención. Este dimensionamiento debe tomar en cuenta a los usuarios habituales y no excepcionales. Por ejemplo, el tráfico pesado puede circular, pero sin disfrutar de excelentes condiciones. Asimismo, las vías no se dimensionan para las horas pico que representan.

En Bolivia principalmente en la ciudad de Tarija la implementación de pavimentos es muy común siendo el más utilizado el pavimento flexible por las ventajas que presenta ya indicados anteriormente, estos pavimentos principalmente los encontramos en las calles urbanas de la ciudad de Tarija, así como en la comunidad de San Lorenzo en un porcentaje mínimo ya que también existe calles pavimentadas con diferentes tipos de pavimento ya sea rígido, articulado y ripio.

Finalmente, la aplicación de pavimentos articulados (adoquines) en nuestro medio fue indispensable e innovador ya que fueron utilizados en las primeras calles de Bolivia; el pavimento articulado en nuestro medio presenta muchas ventajas ya mencionadas anteriormente, en la comunidad de San Lorenzo históricamente sus primeras calles pavimentadas fueron de pavimento articulado (adoquines) como referencia tenemos las calles principales (G. Zilvetty y G. Lunda) pavimentadas hace más de 20 años, estas calles nos servirán de estudio para el análisis de estos dos métodos .

Con la aplicación de este estudio, de dos diferentes métodos queremos obtener los resultados más favorables para un buen dimensionamiento del pavimento para estas calles mencionadas y así colaborar al municipio de San Lorenzo ya que no se realizaron estudio de métodos para mejorar los pavimentos tanto en la comunidad de San Lorenzo como en la ciudad de Tarija.

### **2.27. Costos de construcción.**

La elaboración de los costos es uno de los factores más importantes que se debe tener en cuenta en la construcción de obras, con la finalidad de saber el precio total de una obra, el cual es producto de la sumatoria de distintos ítems componentes del presupuesto total de obra. Es indispensable realizar el análisis de precios unitarios de cada una de las actividades con sus incidencias directas e indirectas.



### **Costos directos.**

Costo de materiales.

Costo de mano de obra.

Herramienta y equipo.

Beneficios sociales.

### **Costos indirectos.**

Gastos generales e imprevistos.

Utilidad.

Impuestos.

#### **2.27.1. Costos directos e indirectos**

El costo directo se conforma de tres componentes que dependen del tipo de actividad que está realizando el costo. La estructura que tienen los Costos Unitarios en cada Ítem de construcción, está conformada por:

Materiales e Insumos

Mano de Obra.

Maquinaria y Equipo.

Los costos indirectos son los gastos que por su naturaleza son de aplicación a las obras ejecutadas en un tiempo determinado, comprendiéndose dentro de los siguientes aspectos:

Beneficios Sociales y de Trabajo.

Amortización o alquiler de maquinaria, equipo y herramientas.

Gastos generales en los que están comprendidos los siguientes rubros:

#### **2.27.2. Gastos generales:**

Alquiler de oficinas, alumbrado, teléfono, limpieza y otros.

Sueldos incluyendo cargas sociales del personal administrativo.

Material de escritorio.

Gastos de movilidad, representación y viáticos del personal superior y Administrativo.

Gastos de inscripción y permanencia en diferentes instituciones.

Gastos en la compra de documentos de Licitación y otros.

Gastos notariales.

Gastos de garantía: (Buena ejecución, cumplimiento de contrato, seriedad de propuesta, correcta inversión de anticipo, etc.)

Utilidad que es un porcentaje del costo, determinado por la Empresa.

Pago de impuestos de financiamiento a diferentes instituciones.

Pago de impuestos de valor agregado y a las transacciones.

### **Costos de materiales.**

El costo de los materiales adoptó costos generales del mercado de la construcción de los materiales que se emplean en determinada actividad y en determinada unidad, donde el precio a considerarse debe ser el costo puesto en obra; dentro de este se tomará en cuenta los costos en el mercado.

### **Costos de la mano de obra.**

Este costo es otro de los factores de incidencia mayor en la elaboración de los costos unitarios de cada actividad la cual se determinó en base a montos que usualmente se pagan en mercado de la construcción.

### **Rendimiento de la mano de obra.**

Los datos de los rendimientos de la mano obra es una actividad de cálculo muy complicada que depende de la experiencia del trabajador. Dentro de este marco se tomó en cuenta rendimientos de mano de obra utilizados para las diferentes actividades.

### **Beneficios sociales**

Según las leyes sociales del país el pago de beneficios sociales a todas las personas asalariadas debe ser involucrados dentro del costo de la mano de obra; dentro de este concepto se tomó en cuenta como factor de incidencia de beneficios sociales 71.18%.

### **Costos de maquinaria y equipo**

Este costo es otro de los factores de incidencia mayor en la elaboración de los costos unitarios de cada actividad para el cual se determinó en base a montos que usualmente se pagan en mercado de la construcción.

### **Rendimientos de maquinaria.**

La determinación del Rendimiento de Equipo es un parámetro fundamental para el análisis de Precios Unitarios.

#### **2.27.3. Cómputos métricos.**

Los cómputos métricos y para mejor apreciación de la incidencia de los costos de construcción y además tener resultados adecuados para las diferentes actividades en la construcción de pavimentos, se realizó cómputos métricos con ancho de vía constante como base, para el cálculo de cómputos métricos con espesores ya calculados con los dos diferentes métodos de dimensionamiento de la estructura del pavimento. Con el siguiente detalle en tablas de cómputos métricos para una longitud de más de medio Kilómetro.

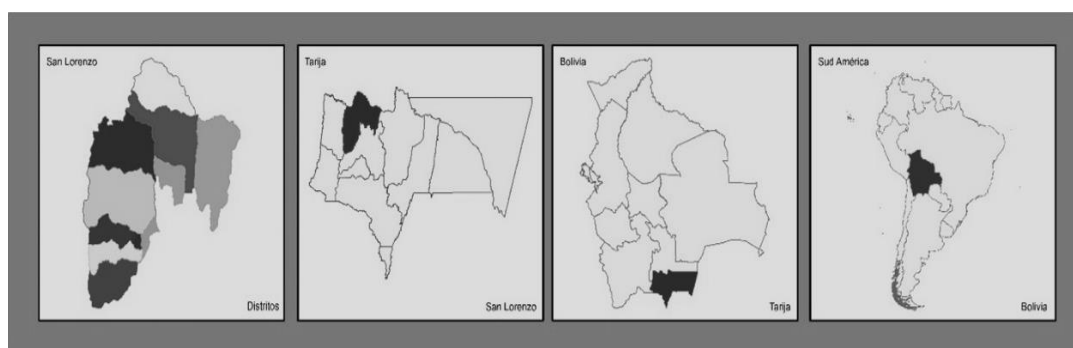
## CAPÍTULO III

### APLICACIÓN DE LA PRÁCTICA

#### 3.1. Ubicación geográfica.

San Lorenzo se encuentra localizada en la parte Norte del departamento de Tarija, con una orientación Noroeste, en proximidad de la serranía de la cordillera de Sama y se prolonga hasta Tomatitas; geográficamente, el municipio, se encuentra entre los: 20° 55' 52" Latitud Sud – 64° 42' 09" Longitud Oeste, con referencia al norte y 21° 34' 44" Latitud Sud – 64° 52' 53" Longitud Oeste en su extremo sud.

Figura 16. Ubicación del municipio de San Lorenzo.




Fuente: Asociación de municipios del departamento de Tarija.

#### 3.1.1. Límites territoriales.

Los límites físicos naturales son la base para la definición de unidades político administrativas como la cordillera de Sama que es el límite natural con el municipio de El Puente por el oeste, al norte con el departamento de Chuquisaca contando como el límite natural del río Pilaya, al sur con la Provincia Cercado y al este con la provincia O'Connor, municipio de Entre Ríos.

El municipio de San Lorenzo limita al norte con la provincia Sud Cinti (Departamento de Chuquisaca), al sur con la sección municipal de Cercado, al este con las secciones municipales de O'Connor y Cercado y al oeste con la segunda sección municipal de la provincia Méndez Municipio El Puente.

Figura 17. Límite territorial del municipio.

Ubicación del municipio	Norte	Sur	Este	Oeste
	Provincia Sud Cinti (Dpto. Chuquisaca)	Provincia Cercado (Municipio Cercado)	Provincia O'Connor (Municipio Entre Ríos)	2da. Sección Méndez (El Puente)

Fuente: Asociación de municipios del departamento de Tarija.

El municipio de San Lorenzo tiene una superficie total aproximada de 2.116 Km<sup>2</sup>, lo que en cifras relativas representa el 5.68% del territorio departamental.

La delimitación del Municipio de San Lorenzo, fue realizada sobre bases legales y formales utilizando cartografía digital y utilizando mapas digitales proporcionados por el Instituto Geográfico Militar.

### 3.2. Características arquitectónicas del municipio.

La capital del municipio de San Lorenzo mantiene hasta la actualidad las construcciones características de la época colonial con balcones de madera, cubiertas a dos aguas con estructura de madera-rollizos y teja y republicana, con rejas metálicas que delimitan los balcones, aunque algunas por el paso del tiempo, más aún con el mejoramiento de vivienda que trató de conservarlo.

Uno de los edificios más relevantes es la casa de Moto Méndez con su entorno histórico-cultural; debe ser conservado por sus connotaciones, y el templo dedicado al Santo Patrono, San Lorenzo, entre otros

Tabla 10. Resumen de las principales características de los suelos.

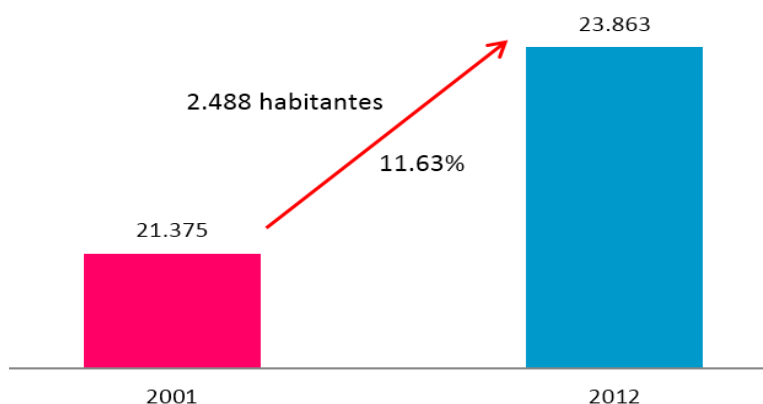
Serie	Profundidad	Textura	Erosión
San Lorenzo	Profundos, imperfectamente drenados	Franco arcillo limoso	No significativo

Fuente: Estudio Semi detallado de suelos del valle central de Tarija. (MACA,) PEA.

### 3.3. Demografía. El departamento y el municipio de San Lorenzo.

Según el censo nacional de población y vivienda 2012 la población del municipio de San Lorenzo es de 23.863 habitantes y según estimaciones realizadas en base a la información de la población a nivel departamental de Tarija según CPV 2012, San Lorenzo habría crecido en un 2.26%, representando un crecimiento en valores absolutos del 11,63% que en términos de población representa 2.488 habitantes.

Figura 18. Población, según censo 2001 y 2012 San Lorenzo



Fuente: Instituto Nacional de Estadística, CPV 2012

### 3.4. Infraestructura vial.

El municipio en general presenta una regular conexión vial contando con una articulación en proceso de consolidarse; obviamente existen comunidades que no cuentan, con acceso carretero, pero un gran porcentaje está sólidamente articulado; a pesar que los accesos de los mismos no llegan a la mayoría de los domicilios y generalmente entran y/o pasan por inmuebles de bien común como son las escuelas, centros de salud, entre otros.

Continuando con el análisis del área rural, la vía de primer orden está constituida por la ruta que conecta desde la Ciudad de Tarija- Tomatitas- San Lorenzo – Tomatas Grande, esta ruta esta asfaltada y es parte de una de las principales vías del municipio; esta es la única vía asfaltada, el resto se distribuye en: Empedrado, ripio y de tierra.

Tabla 11. Vías camineras.

Tipo de Vía	Longitud km.	Porcentaje
Asfaltado	70	7%

Empedrado	35	5%
En Construcción	25	3%
Ripio	590	79%
Tierra	41	6%
Total	761	100%

Fuente: SEDECA

### **3.5. Problemática identificada en el municipio.**

Escasa y deficiente vinculación caminera presenta el municipio, principalmente en la zona alta del río Pilaya, en parte a lo disperso y accidentado del territorio, la poca capacidad instalada del gobierno municipal que solo puede hacer algunas obras de mantenimiento y con mucha dificultad las aperturas; además en el municipio, existen comunidades que son de poca población, dispersa y alejada, lo que hace más complicada la apertura de caminos, por ser proyectos con un costo/beneficio negativo.

### **3.6. Vinculación vial.**

Proyectos viales en actual ejecución, la conectividad caminera municipal y la apertura de nuevos mercados, permitirán la comercialización de los productos agropecuarios.

La infraestructura caminera es deficiente, inadecuada y desarticulada, lo que eleva los costos de transporte, dificultando el acceso a los mercados de consumo y la provisión de insumos para la producción agropecuaria.

Municipio disperso y accidentado dificulta la integración vial.

Poca capacidad instalada del municipio para encarar aperturas de caminos a sus comunidades

Dificultades marcadas en el mantenimiento de los caminos vecinales.

#### **3.6.1. Integración vial.**

Las regiones se potencian cuando se articulan, cuando sus productos son transportados a mercados y las oportunidades se ven relacionadas, por eso la articulación vial se convierte

en un área de desarrollo estratégico, enmarcado en las competencias municipales se deben mantener, mejorar y apertura de nuevos caminos

### **3.6.2. Objetivo estratégico vial.**

Fortalecer la integración municipal a través de la implementación de un plan de infraestructura vial, que permita la articulación y la comunicación ininterrumpida, que garantice un abastecimiento de productos a mercados de consumo y generando condiciones de tránsito favorables para los visitantes.

### **3.7. Ubicación del proyecto.**

La ubicación específica del proyecto será en dos calles principales de la localidad de San Lorenzo, Tarija-Bolivia, como ser la calle (C.G. ZILVETTY y GABRIEL LUNDA) cuyas estructuras de pavimentación son de materiales no convencionales (adoquín).

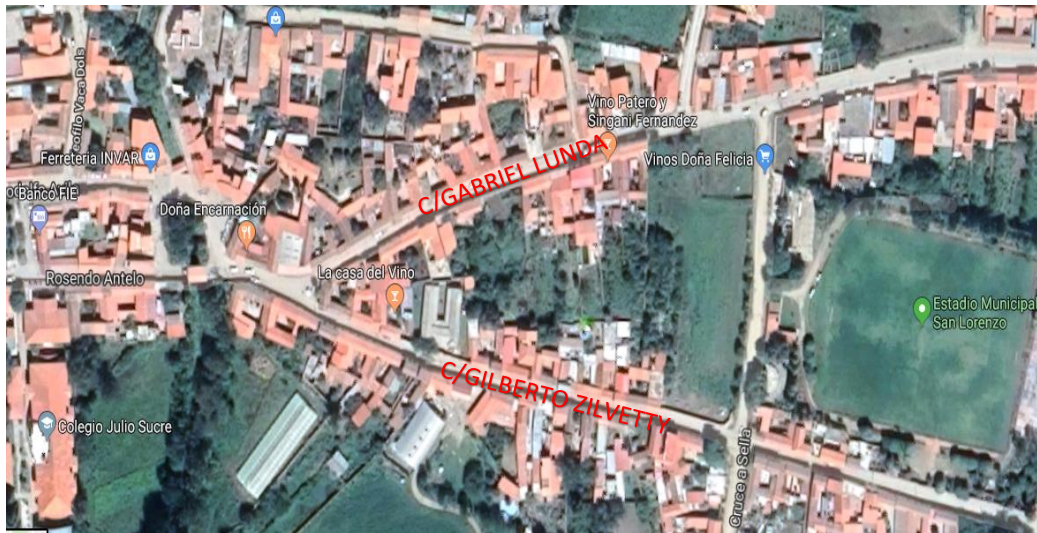
Figura 19. Ubicación de las calles en estudio (C.G.Zilvetty y Gabriel Lunda), municipio de San Lorenzo.



Fuente: Elaboración propia.



Figura 20. Ubicación de las calles para el proyecto en el municipio de San Lorenzo.  
Calles. C.G. Zilvetty y Gabriel Lunda.



Fuente: Google Maps satelital.

Figura 21. Plano cartográfico de las calles del proyecto en la comunidad de San Lorenzo, ubicación de las tomas de muestra de suelos.



Fuente: Asociación de municipios del departamento de Tarija.

### 3.8. La caracterización de los suelos consistirá en ensayos de muestras.

Extracción de las muestras en base a la norma (ASTM D4220) de la ABC, (Administradora Boliviana de Carreteras).

Análisis granulométrico (AASHTO T-27).

Ensayos de límites de Atterberg (Limite Liquido) (AASHTO T-89).

Ensayos de límites de Atterberg (Limite Plástico) (AASHTO T-90).

Ensayos de compactación (AASHTO T-180).

Ensayos de C.B.R (AASHTO T-180).

Ensayo de resistencia a compresión de adoquines (ASTM C39 – AASHTO T22)

Tabla 12. Dimensiones de la extracción de las muestras.

Dimensiones de la extracción de la muestra			
Muestra.	a (cm)	b (cm)	Profundidad (cm)
1	60	50	50
2	60	50	50
3	60	50	50

Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Extracción de la muestra.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.1. Resultado del ensayo Análisis granulométrico (AASHTO T-27).

Tabla 13. Resultados de la granulometría suelos 1,2 y 3 (subbase).

<b>Clasificación (AASHTO M 145) suelo 1.</b>	
AASHTO	A - 2 - 4 (0)
Unificada	Grava mal graduada con arcilla y limo con arena GP GC
<b>Clasificación (AASHTO M 145) suelo 2.</b>	
AASHTO	A - 2 - 4 (0)
SUCS	Grava mal graduada con arcilla y limo con arena GP GC
<b>Clasificación (AASHTO M 145) suelo 3.</b>	
AASHTO	A - 2 - 4 (0)
SUCS	Grava mal graduada con arcilla y limo con arena GP GC

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Resultados de la granulometría suelos 1,2, y 3 (subrasante).

<b>Clasificación (AASHTO M 145) suelo 1</b>	
AASHTO	A - 2 - 6 (1)
SUCS	Grava arcillosa-limosa con arena GC
<b>Clasificación (AASHTO M 145) suelo 2</b>	
AASHTO	A - 2 - 6 (1)
SUCS	Grava arcillosa-limosa con arena GC
<b>Clasificación (AASHTO M 145) suelo 3</b>	
AASHTO	A - 2 - 6 (1)
SUCS	Grava arcillosa-limosa con arena GC

Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Análisis granulométrico de los suelos (tamizado).



Fuente: Elaboración propia laboratorio S.A.H.

### 3.8.2. Resultado del ensayo límites de Atterberg (LL. AASHTO T- 89, LP. T-90).

Tabla 15. Resultados del ensayo de límites de Atterberg suelos 1,2 y 3 (subbase).

Suelo 1							
Límite líquido	19.2		Límite plástico		12.7	Índice de plasticidad	6.5
Coefficiente de uniformidad	117.59	D60=	12.10	D30=	2.89	D10=	0.10
Suelo 2							
Límite líquido	19.5		Límite plástico		12.9	Índice de plasticidad	6.6
Coefficiente de uniformidad	102.51	D60=	10.14	D30=	3.25	D10=	0.10
Suelo 3							
Límite líquido	19.8		Límite plástico		13	Índice de plasticidad	6.8
Coefficiente de uniformidad	107.86	D60=	12.04	D30=	3.15	D10=	0.11

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Resultados del ensayo de límites de Atterberg (subrasante).

<b>Suelo 1</b>							
Límite líquido	29.1		Límite plástico		16.1	Índice de plasticidad	13.0
Coefficiente de uniformidad	0	D60=	4.24	D30=	0	D10=	0
<b>Suelo 2</b>							
Límite líquido	29.3		Límite plástico		16.0	Índice de plasticidad	13.2
Coefficiente de uniformidad	0	D60=	4.62	D30=	0	D10=	0
<b>Suelo 3</b>							
Límite líquido	28.9		Límite plástico		16	Índice de plasticidad	12.9
Coefficiente de uniformidad	0	D60=	3.52	D30=	0	D10=	0

Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Realización de los límites del suelo.



Fuente: Elaboración propia laboratorio S.A.H.

### 3.8.3. Resultado del ensayo Compactación (AASHTO T – 180).

Tabla 17. Resultados del ensayo de compactación (AASHTO T-180) suelos 1,2 y 3 (subbase).

<b>Suelo 1</b>		
Densidad máxima =	2242	Kg./m <sup>3</sup>
Humedad óptima =	7.0	%
<b>Suelo 2</b>		
Densidad máxima =	2248	Kg./m <sup>3</sup>
Humedad óptima =	7.1	%
<b>Suelo 3</b>		
Densidad máxima =	2250	Kg./m <sup>3</sup>
Humedad óptima =	6.7	%

Fuente: Elaboración propia laboratorio S.A.H.

Tabla 18. Resultados del ensayo de compactación (AASHTO T-180) suelos 1,2 y 3 (subrasante).

<b>Suelo 1</b>		
Densidad máxima =	1926	Kg./m <sup>3</sup>
Humedad óptima =	11.90	%
<b>Suelo 2</b>		
Densidad máxima =	1938	Kg./m <sup>3</sup>
Humedad óptima =	12.2	%
<b>Suelo 3</b>		
Densidad máxima =	1936	Kg./m <sup>3</sup>
Humedad óptima =	12.0	%

Fuente: Elaboración propia laboratorios S.A.H.

Figura 25. Compactacion del suelo.



Fuente: Elaboración propia laboratorio S.A.H.

### 3.8.4. Resultados del ensayo de la Relación de Soporte de California (CBR).

Tabla 19. Resultados del ensayo (CBR) suelos 1,2 y 3 (subbase).

<b>Suelo 1</b>			
Dens. Al 90% :	2.018 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. AL 90% :	23.2
Dens. Al 95% :	2.130 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. AL 95% :	43.2
Dens. Al 97% :	2.175 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. AL 97% :	51.2
Dens. Al 100% :	2.242 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R..AL 100% :	63.2
Exp. Al 95% :	0.49	Exp. Al 100% :	0.65
<b>Suelo 2</b>			
Dens. Al 90% :	2.023 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. AL 90% :	23.5
Dens. Al 95% :	2.136 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. AL 95% :	42.1
Dens. Al 97% :	2.181 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. AL 97% :	49.6
Dens. Al 100% :	2.248 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. AL 100% :	60.7

Exp. Al 95% :	0.54	Exp. Al 100% :	0.60
<b>Suelo3</b>			
Dens. Al 90%	2.025 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. AL 90% :	25.2
Dens. Al 95% :	2.137 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. AL 95% :	45.2
Dens. Al 97% :	2.182 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. AL 97% :	53.2
Dens. Al 100% :	2.250 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. AL 100% :	65.2
Exp. Al 95% :	0.49	Exp. Al 100% :	0.69

Elaboración propia laboratorio S.A.H.

Tabla 20. Resultados del ensayo valor soporte california (CBR) subrasante.

<b>Suelo 1</b>			
Dens. Al 90% :	1.734 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. Al 90% :	4.4
Dens. Al 95% :	1.830 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. Al 95% :	11.4
Dens. Al 97% :	1.869 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. Al 97% :	14.2
Dens. Al 100% :	1.926 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. Al 100% :	18.3
Exp. Al 95% :	1.50	Exp. Al 100% :	1.65
<b>Suelo 2</b>			
Dens. Al 90% :	1.742 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. Al 90% :	5.2
Dens. Al 95% :	1.839 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. Al 95% :	10.4
Dens. Al 97% :	1.878 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. Al 97% :	12.6
Dens. Al 100% :	1.936 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. Al 100% :	15.7
Exp. Al 95% :	1.53	Exp. Al 100% :	1.69
<b>Suelo 3</b>			
Dens. Al 90% :	1.734 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. Al 90% :	3.9
Dens. Al 95% :	1.830 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. Al 95% :	10.1
Dens. Al 97% :	1.869 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. Al 97% :	12.6
Dens. Al 100% :	1.926 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. Al 100% :	16.3
Exp. AL 95% :	1.50	EXP. AL 100% :	1.74

Elaboración propia laboratorio S.A.H.



Figura: 26. Lectura de la expansión del suelo.



Fuente: Elaboración propia laboratorio S.A.H.

### 3.8.5. Ensayo de resistencia a compresión del adoquín (ASTM C39 – AASHTO T22)

Figura 27. Ruptura del adoquín a compresión.



Fuente: Elaboración propia, laboratorio Ing. Civil. U.A.J.M.S

Tabla 21. Laboratorio tecnología del hormigón.

Ensayo de resistencia a compresión de adoquines doble (S) de hormigón.

N°	Fac. Correc. Altura	Área	Área de contacto	Resistencias		
				Lecturas	Por área	Por altura
	Fc	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	Mpa	Mpa correg.	Mpa correg.
1	1.29	288	253	12.97	14.76	19.05
2	1.29	288	253	10.33	11.76	15.17
3	1.29	288	253	9	10.25	13.22
4	1.29	288	253	11.48	13.07	16.86
5	1.29	288	253	14.21	16.18	20.87
6	1.29	288	253	13.5	15.37	19.82
7	1.29	288	253	9.54	10.86	14.01
8	1.29	288	253	14.9	16.96	21.88
9	1.29	288	253	14.55	16.56	21.37
10	1.29	288	253	9.55	10.87	14.02
11	1.29	288	253	12.25	13.94	17.99
12	1.29	288	253	13	14.80	19.09
13	1.29	288	253	14.45	16.45	21.22
14	1.29	288	253	13.67	15.56	20.07
15	1.29	288	253	12.8	14.57	18.80
16	1.29	288	253	12.15	13.83	17.84
17	1.29	288	253	13.75	15.65	20.19
18	1.29	288	253	13.5	15.37	19.82
19	1.29	288	253	11.56	13.16	16.98
20	1.29	288	253	10.9	12.41	16.01
21	1.29	288	253	13.87	15.79	20.37
22	1.29	288	253	13.55	15.42	19.90
23	1.29	288	253	13.1	14.91	19.24
24	1.29	288	253	14.33	16.31	21.04
25	1.29	288	253	12.89	14.67	18.93
26	1.29	288	253	14.25	16.22	20.93
27	1.29	288	253	13.95	15.88	20.48
28	1.29	288	253	14.5	16.51	21.29
29	1.29	288	253	13.75	15.65	20.19
30	1.29	288	253	11.98	13.64	17.59

Fuente: Elaboración propia.

Elaborando un análisis estadístico de la ruptura a compresión del material (adoquín) se determinó tomar la Media de los resultados obtenidos con el análisis estadístico descriptivo e inferencial.

Media = 18.808 Mpa.

Tabla 22. Laboratorio de tecnología del hormigón ensayo de resistencia a flexión y tracción del adoquín.

$$f_{ct} = f_{ct,f} * 0,5 \qquad f_{ct,f} = \frac{3*F}{a^2} \qquad f_{ct} = \left(\frac{3*F}{a^2}\right) * 0,5$$

Donde:

F = Carga directa aplicada con la prensa de flexo tracción.

a = Dimensión o lado de la sección de la viga.

fct,f = Resistencia a flexo tracción

fct = Resistencia a tracción.

Nº Adoq.	Especificación	Identificación	Edad (días)	Dim. "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (kg)	Flextr. (fct,f) (Kg/cm2)	Tracción (fct) (Kg/cm2)
1	Calles: G. Zilvetty y G. Lunda	San Lorenzo	28	12	30.6	3121.20	65.03	32.51
2	Calles: G. Zilvetty y G. Lunda	San Lorenzo	28	12	39.7	4049.40	84.36	42.18
3	Calles: G. Zilvetty y G. Lunda	San Lorenzo	28	12	27.5	2805.00	58.44	29.22

Fuente: Elaboración propia.

### 3.9. Aforo de vehículos calle C.G. Zilvetty.

Tabla 23. Aforo de vehículos horas de 07:00 Am - 18:00

<b>Vehículos</b>	<b>Hora</b>	<b>Derecha(ida)</b>	<b>Izquierda (vuelta)</b>
Pesados de 2 ejes	07 am- 18 pm	19	0
Camioneta pública	07 am- 18 pm	21	0
Camioneta particular	07 am- 18 pm	139	1
Micro público (minibús)	07 am- 18 pm	170	0
Taxi	07 am- 18 pm	144	0
Particulares	07 am- 18 pm	214	4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Composición de volúmenes de tráfico diario.

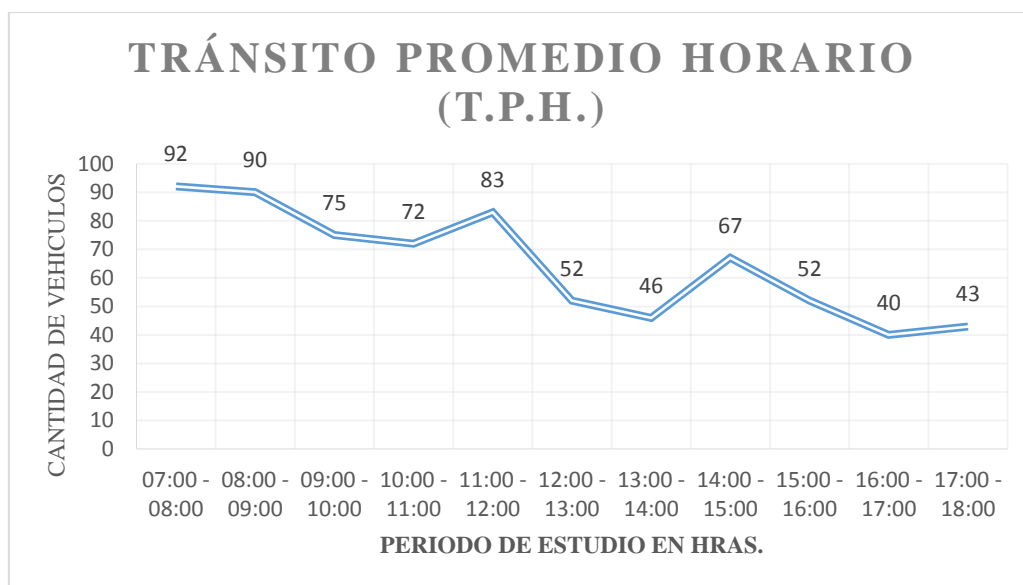
Calle: C.G.Zilvetty

<b>Hora</b>	<b>Vehículos</b>
<b>07:00 - 08:00</b>	92
<b>08:00 - 09:00</b>	90
<b>09:00 - 10:00</b>	75
<b>10:00 - 11:00</b>	72
<b>11:00 - 12:00</b>	83
<b>12:00 - 13:00</b>	52
<b>13:00 - 14:00</b>	46
<b>14:00 - 15:00</b>	67
<b>15:00 - 16:00</b>	52
<b>16:00 - 17:00</b>	40
<b>17:00 - 18:00</b>	43

Fuente: Elaboración propia.

Total = 712 vehículos.

Gráfica 1. Tránsito horario (T.P.H): calle C.G.Zilvetty.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.10. Aforo de vehículos calle Gabriel Lunda.

Tabla 25. Resumen total de aforo horas de 07:00 am - 18:00

Vehiculos	Hora	Derecha(ída)	Izquierda (vuelta)
Pesados de 2 ejes	07 am- 18 pm	14	23
Camioneta pública	07 am- 18 pm	29	53
Camioneta particular	07 am- 18 pm	117	137
Micro público (minibús)	07 am- 18 pm	203	269
Taxi	07 am- 18 pm	131	161
Particulares	07 am- 18 pm	180	261

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Composición de volúmenes de tráfico diario.

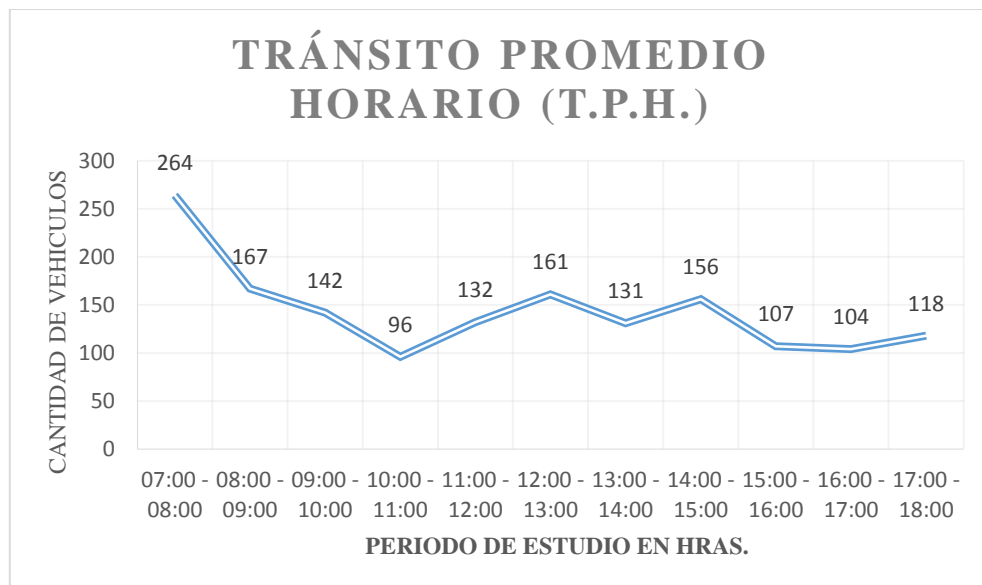
Calle: Gabriel Lunda.

Hora	Vehículos
07:00 - 08:00	264
08:00 - 09:00	167
09:00 - 10:00	142
10:00 - 11:00	96
11:00 - 12:00	132
12:00 - 13:00	161
13:00 - 14:00	131
14:00 - 15:00	156
15:00 - 16:00	107
16:00 - 17:00	104
17:00 - 18:00	118

Fuente: Elaboración propia.

Total = 1578 vehículos.

Gráfica 2. Tránsito Horario (T.P.H) calle Gabriel Lunda.



Fuente: Elaboración propia.

### **3.11. Justificación del tiempo de aforo.**

La norma de la ABC e ingeniería de tránsito nos recomienda que un aforo vehicular se tiene que realizar durante el periodo de una semana por 24 horas, contando con el suficiente personal; tener un buen aforado de los vehículos que circulan por determinadas vías, a efecto de diseño. Para este proyecto justificaremos porque se tomó tres días de aforo.

Se realizó el aforo de los vehículos según su clasificación y tipo tomando en cuenta 6 categorías de las (12) que nos presenta la norma de la ABC.

Uno de los puntos importantes para justificar el aforo para el proyecto fue el no contar con el suficiente personal y tiempo para la elaboración de los aforos en las dos vías en estudio, se consideró 50 % de los días que recomienda la norma ABC porque estos datos ya son representativos para el cálculo requerido; otro de los factores a considerar es la ubicación de los tramos ya que estos se encuentran fuera de la zona urbana; por tanto no presentaban un tráfico alto, si bien la norma nos recomienda seguir los pasos para un aforamiento vehicular no rige establecer al pie de la letra la norma, sino debemos tomar criterios como ingenieros para obtener datos que nos sirvan para los cálculos requeridos.

### 3.12. Ejes equivalentes.

Tabla 27. Cálculo de los ejes equivalentes para la calle Gabriel Lunda.

$F_c = 2$

$I = 0,074$

$T = 20$

$DD = 0,5$

$DC = 1$

Tipo de vehículo	Tipo de eje	TPD	Carga por eje		Lefs		ESAL's	Factor de camión	Tránsito de diseño	ESAL's de diseño		
			Kips	Ton	18000 Lb	Total						
Automóviles	simple	733	2	0,907	0,0002	0,0004	0,2932	0,0004	11706964,15	4682,78566		
	simple		2	0,907	0,0002							
Camioneta	simple	336	4	1,814	0,002	0,035	11,76	0,035	5366357,373	187822,508		
	simple		8	3,629	0,033							
Mini bus (12-21 Ast)	simple	472	8	3,629	0,033	0,216	101,952	0,216	7538454,404	1628306,15		
	simple		12	5,443	0,183							
Camión	simple	37	8	3,629	0,034	0,876	32,412	0,876	590938,163	517661,831		
	tándem		32	14,515	0,842							
		$\Sigma =$	1578								$\Sigma =$	2338473,28

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Tránsito de diseño} = TPD * \frac{(1+i)^t - 1}{\ln(1+i)} * DD * DC * FC * 365$$



Tabla 28. Cálculo de los ejes equivalentes para la calle G. Zilvetty.

Fc= 2

i= 0.074

t= 20

DD= 0.5

DC= 1

Tipo de vehículo	Tipo de eje	TPD	Carga por eje		Lefs		ESAL´S	Factor de camión	Tránsito de diseño	ESAL`s de diseño
			Kips	Ton	18000 Lb	Total				
Automóviles	simple	362	2	0.907	0.0002	0.0004	0.1448	0.0004	5781611.2	2312.64449
	simple		2	0.907	0.0002					
Camioneta	simple	161	4	1.814	0.002	0.035	5.635	0.035	2571379.6	89998.2851
	simple		8	3.629	0.033					
Mini bus (12-21 Ast)	simple	170	8	3.629	0.033	0.216	36.72	0.216	2715121.3	586466.199
	simple		12	5.443	0.183					
Camión	simple	19	8	3.629	0.034	0.876	16.644	0.876	303454.73	265826.346
	tándem		32	14.515	0.842					
		Σ=	712						Σ=	944603.47

Fuente: Elaboración propia.

### **Distribución direccional Dd.**

El número de ejes equivalentes total representa al total de vehículos correspondientes a todos los carriles en ambas direcciones; se asigna, por carril un 50% para cada sentido; la distribución direccional será:

$$Dd = 50 \%$$

### **Distribución por carriles DI.**

De acuerdo a la recomendación de distribución de carriles por la AASHTO se utiliza el siguiente:

$$DI = 100 \%$$

### **3.13. ESALs o W18 de diseño.**

El tránsito de diseño es el número obtenido que representa al total de ejes equivalentes de todos los carriles y ambas direcciones de viaje, por lo que se debe distribuir por dirección y por carril de acuerdo al método:

$$ESALs \text{ ó } w_{18} = \frac{Dd}{100} * \frac{DI}{100} * ESAL'_s$$

Donde:

W18 = Tránsito de diseño.

ESAL's = Cargas equivalentes de eje simple.

Se tiene: ESALs o W18 = 1169237 Tránsito de ejes simples. (Calle: G.Lunda)

ESALs o W18 = 472302 Tránsito de ejes simples. (Calle: G.Zilvetty)

### 3.14. Espesores mínimos en función del SN estructural.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3$$

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN_1^* = a_1 D_1 > SN_1$$

$$D_2^* = \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 m_2}$$

$$SN_1^* + SN_2 \geq SN_2$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

$$SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* \geq SN \quad \text{Verification.}$$

Donde:

$a_1, a_2, a_3$  = Coeficientes estructurales o de capa, adimensionales.

$m_1, m_2, m_3$  = Coeficientes de drenaje.

$D_1, D_2, D_3$  = Espesores de capas, en pulg. o mm; en este sentido, el número estructural llevará las unidades de los espesores de las diferentes capas del pavimento. Este procedimiento no es aplicable para determinar espesores de capas sobre otras que tengan un módulo resiliente mayor de 280 MPa (40000 psi). En este caso el espesor de la capa situada encima será establecido en base a la relación costo – eficiencia y espesores mínimos desde el punto de vista constructivo.

### 3.15. Cálculo método mecanicista AASHTO-93 pavimento flexible.

Para el cálculo del dimensionamiento del pavimento flexible se optó por tomar la media de nuestros resultados de los CBR realizados, apoyados a un análisis estadístico descriptivo e inferencial.

$$\text{CBR subrasante} = 10.65 \%$$

$$\text{CBR subbase} = 43.51 \%$$

Medida de la rigidez del suelo de la subrasante:

$$MR_{(PSI)} = 2555 * CBR^{0.64} \quad (\text{AASHTO 2002})$$

**Datos de entrada.**

CBR de diseño.	= 10.65 %
Módulo resiliente concreto asfáltico	= 400000 [psi]
Módulo resiliente sub-base (CBR 43,65 %)	= 17500 [psi]
Módulo resiliente base (CBR 43,65 %)	= 23000 [psi]
Módulo resiliente sub-rasante	= 11612 [psi]
Periodo de diseño	= 20 AÑOS
Ejes equivalentes en el periodo diseño 80 KN ESALs	= W8 1169237
Factor de confiabilidad (R )	= 95 % Zr: -1.645
Serviciabilidad standart (So)	= 0.49
Serviciabilidad inicial (Pi)	= 4.2
Serviciabilidad final (Pt)	= 2.5

**Coefficientes estructurales.**

Coefficiente de capa asfáltica (a1)	= 0.42
Coefficiente de capa base (a2)	= 0.114
Coefficiente de capa sub-base (a3)	= 0.125

**Coefficientes de drenaje**

Coefficiente de la capa asfáltica (m1)	= 1
Coefficiente de capa base (m2)	= 0.80
Coefficiente de capa sub-base (m3)	= 0.80

Número estructural calculado: (Ábaco de diseño AASTHO para pavimentos flexibles).

$$SN = 3.47 \text{ Pulg.}$$

Espesores mínimos en base en función del SN estructural.

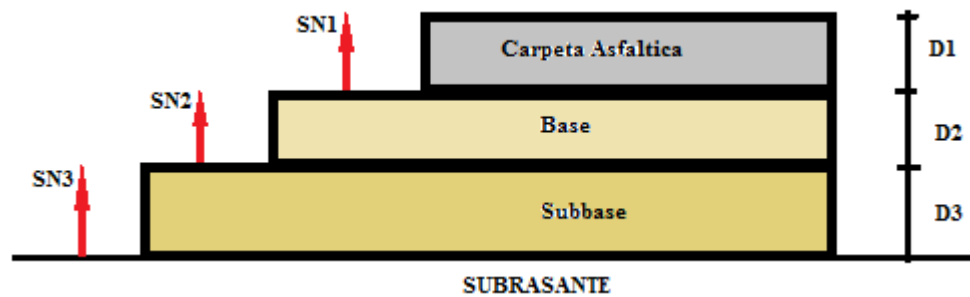
$$D1 = 5.85 \text{ Pulg.} = 6 \text{ Pulg.} \quad SN1^* = 2.52 \text{ Pulg.}$$

$$D2 = 3.62 \text{ Pulg.} = 4 \text{ Pulg.} \quad SN^*2 = 0.36 \text{ Pulg.}$$

$$D3 = 5.90 \text{ Pulg.} = 6 \text{ Pulg.} \quad SN3^* = 0.60 \text{ Pulg.}$$

$$SN^* = 3.48 \geq SN = 3.47$$

Figura 28. Dimensionamiento de las capas del pavimento.



Fuente: Elaboración propia.

$$D1 = 6 \text{ Pulg.} = 15,24 \text{ cm} \quad \text{adoptaremos un espesor constructivo } D1 = 5 \text{ cm.}$$

$$D2 = 4 \text{ Pulg.} = 10,16 \text{ cm} \quad \text{adoptaremos un espesor constructivo } D2 = 15 \text{ cm.}$$

$$D3 = 6 \text{ Pulg.} = 15,24 \text{ cm} \quad \text{adoptaremos un espesor constructivo } D3 = 20 \text{ cm.}$$

### 3.15.1. Cálculo mediante el programa AASHTO (1993) por Luis Vásquez para el diseño de pavimentos.

Figura 29. Programa AASHTO 93 resultados.

Fuente: Programa AASHTO 93 diseño de pavimentos.

Figura 30. Resultados del programa.

```

GUÍA AASHTO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS (1993)
Por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, Colombia. 2005.

PAVIMENTO FLEXIBLE
Confiabilidad : 95 % Zr = - 1.645
Desviación estándar (So) : 0.49
PSI inicial : 4.20
PSI final : 2.50
Tránsito de diseño (W18) : 1.169E+006
Módulo resiliente de la subrasante (Mr)-psi- : 1.161E+004
=====
Capa  Módulo (psi)  a ( )  m ( )
=====
1  4.000e+005  0.42  1.00
2  2.300e+004  0.11  0.80
3  1.750e+004  0.13  0.80
=====
SN necesario: 3.30. SN dispuesto: 3.88
=====
SN  D (plg)  D redon (plg)  D* (plg)  SN*
=====
2.53  6.02E+00  6.50E+00  6.50E+00  2.73
2.82  9.90E-01  1.00E+00  6.00E+00  0.55
3.30  2.30E-01  5.00E-01  6.00E+00  0.60
=====
Tránsito real para la estructura dispuesta : 3.207E+006
    
```

Fuente: Programa AASHTO 93 diseño de pavimentos.

D1 = 6.5 Pulg. = 16.51 cm adoptaremos un espesor constructivo D1 = 5 cm.

D2 = 6 Pulg. = 15.24 cm adoptaremos un espesor constructivo D2 = 15 cm.

D3 = 6 Pulg. = 15.24 cm adoptaremos un espesor constructivo D3 = 20 cm.

### **3.16. Cálculo para el dimensionamiento del pavimento articulado (adoquín) por el método Mecanicista.**

Considerando al adoquín como un pavimento flexible se obtiene el MR del hormigón; previamente, realizando un análisis estadístico, tomaremos la media de 30 resultados obtenidos sobre la resistencia a compresión del adoquín.

$$f_c = 18.808 \text{ Mpa} = 2727.870 \text{ Psi}$$

$$E_c = 57000 * (f_c)^{0.5}$$

$$E_c = 2977053.851 \text{ Psi}$$

Se obtuvo a1 de la curva de asfaltos para el módulo elástico, se adoptó 0,46 que viene a ser el máximo dato a obtener por la curva y se adoptó un coeficiente de drenaje de m1 = 1,1 del hormigón.

#### **3.16.1. Método mecanicista AASHTO-93 pavimento articulado (Adoquín).**

Para el cálculo del dimensionamiento del pavimento articulado (adoquín), se optó por tomar la media de nuestros resultados de los CBR realizados, apoyados a un análisis estadístico descriptivo e inferencial.

$$\text{CBR subrasante} = 10.65 \%$$

$$\text{CBR subbase} = 43.51 \%$$

Medida de la rigidez del suelo de la subrasante:

$$MR_{(PSI)} = 2555 * \text{CBR}^{0.64} \quad (\text{AASHTO 2002})$$

#### **Datos de entrada.**

$$\text{CBR de diseño.} = 10.65 \%$$

$$\text{Módulo resiliente concreto asfáltico} = 2977053.851 \text{ [psi]}$$

$$\text{Módulo resiliente sub-base (CBR 43.51 \%)} = 17500 \text{ [psi]}$$

Módulo resiliente base (CBR 43,51 %)	= 23000	[psi]
Módulo resiliente sub-rasante	= 11612	[psi]
Periodo de diseño	= 20 AÑOS	
Ejes equivalentes en el periodo diseño	80 KN ESALs = W8	1169237
Factor de confiabilidad (R )	= 95 %	Zr: -1.645
Serviciabilidad standart (So)	= 0.49	
Serviciabilidad inicial (Pi)	= 4.2	
Serviciabilidad final (Pt)	= 2.5	

#### **Coefficientes estructurales.**

Coefficiente para el Adoquín (a1)	= 0.46
Coefficiente de capa base (a2)	= 0.114
Coefficiente de capa sub-base (a3)	= 0.125

#### **Coefficientes de drenaje**

Coefficiente de la capa asfáltica (m1)	= 1.1
Coefficiente de capa base (m2)	= 0.80
Coefficiente de capa sub-base (m3)	= 0.80

Número estructural calculado: (Ábaco de diseño AASTHO para pavimentos flexibles).

$$SN = 4.47 \text{ pulg.}$$

Espesores mínimos en base en función del SN estructural.

$$D1 = 5.36 \text{ Pulg.} = \mathbf{6 \text{ Pulg.}} \quad SN1^* = 2.76 \text{ Pulg.}$$

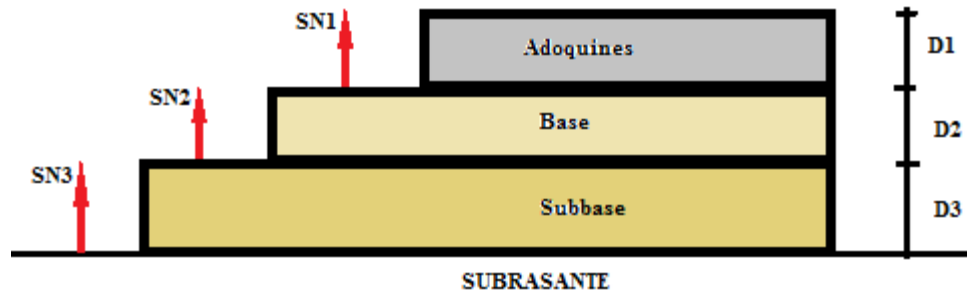
$$D2 = 0.99 \text{ Pulg.} = \mathbf{1 \text{ Pulg.}} \quad SN^*2 = 0.09 \text{ Pulg.}$$

$$D3 = 6.19 \text{ Pulg.} = \mathbf{7 \text{ Pulg.}} \quad SN3^* = 0.70 \text{ Pulg.}$$

$$SN^* = \mathbf{3.55} \geq SN = \mathbf{3.47}$$



Figura 31. Dimensionamiento de las capas del pavimento con adoquín.



Fuente: Elaboración propia.

D1 = 6 Pulg. = 15.24 cm adoptaremos un espesor constructivo D1 = 10 cm.

D2 = 1 Pulg. = 2.54 cm adoptaremos un espesor constructivo D2 = 15 cm.

D3 = 7 Pulg. = 17.78 cm adoptaremos un espesor constructivo D3 = 20 cm.

### 3.16.2. Cálculo mediante el programa AASHTO (1993) por Luis Vásquez para el diseño de pavimentos articulados (adoquines).

Figura 32. Programa AASHTO 93. Considerando al adoquín.

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vásquez

Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento:  Flexible  Rígido

Confiabilidad (R) y desviación estándar (So): 95 % Zr = -1.645, So = 0.49

Serviciabilidades inicial y final: PSI inicial = 4.2, PSI final = 2.5

Tránsito de diseño: W18 = 1169237

Capa	Módulo de elasticidad (psi)	Coefficiente de capa (ai)	Coefficiente de drenaje (mi)	SN necesario	Esesor D (plg.)	Esesor D* (plg.)	SN* dispuesto
1	2977053.851	¿E/a?	0.46	2.53	5.50 5.5	5.5	2.53
2	23000	¿E/a?	0.114	2.82	3.18 3.5	6.0	0.55
3	17500	¿E/a?	0.125	3.30	2.23 2.5	6.0	0.60
4	11612	MR					3.68 OK

W18 real: 2.31E+006

Cálculo de W18 para un SN: SN = 3.70, W18 = 2.40E+006

Quitar el control de variables

Fuente: Programa AASHTO 93 diseño de pavimentos.

Figura 33. Resultados del programa. Considerando al adoquín.

```

GUÍA AASHTO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS (1993)
Por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, Colombia. 2005.

PAVIMENTO FLEXIBLE
Confiabilidad                : 95 %   Zr = - 1.645
Desviación estándar (So)    : 0.49
PSI inicial                  : 4.20
PSI final                    : 2.50
Tránsito de diseño (W18)    : 1.169E+006
Módulo resiliente de la subrasante (Mr)-psi- : 1.161E+004
=====
Capa   Módulo (psi)   a ( )   m ( )
=====
1      2.977e+006     0.46   1.00
2      2.300e+004     0.11   0.80
3      1.750e+004     0.13   0.80
=====

SN necesario: 3.30. SN dispuesto: 3.68
=====
SN      D (plg)   D redon(plg)   D* (plg)   SN*
=====
2.53    5.50E+00    5.50E+00      5.50E+00   2.53
2.82    3.18E+00    3.50E+00      6.00E+00   0.55
3.30    2.23E+00    2.50E+00      6.00E+00   0.60
=====
Tránsito real para la estructura dispuesta : 2.306E+006

```

Fuente: Programa AASHTO 93 diseño de pavimentos.

D1 = 5.5 Pulg. = 13.97 cm adoptaremos un espesor constructivo D1 = 10 cm.

D2 = 6 Pulg. = 15.24 cm adoptaremos un espesor constructivo D2 = 15 cm.

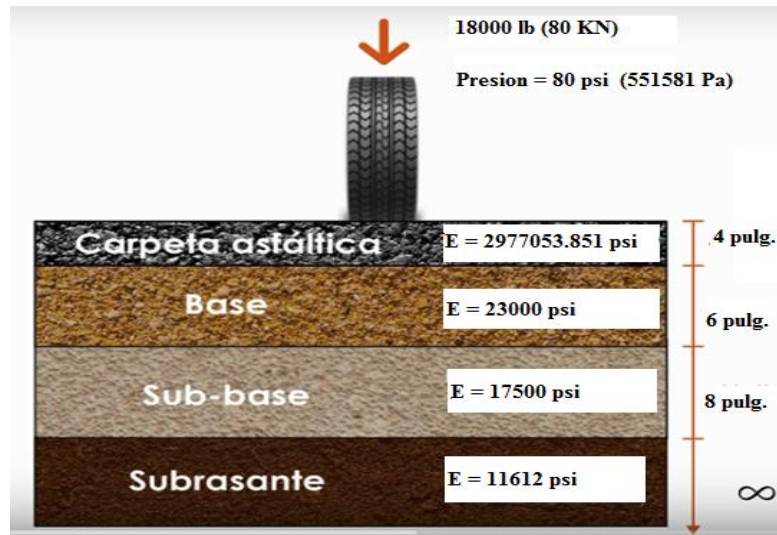
D3 = 6 Pulg. = 15.24 cm adoptaremos un espesor constructivo D3 = 20 cm.

### 3.16.3. Cálculo de los esfuerzos, deformación y deflexión del pavimento.

Para la determinación de estos cálculos se recurrió al apoyo del software PITRA PAVE (Multicapa Elástica) análisis de pavimentos.

Datos de entrada en el esquema con sus características mecánicas y el coeficiente de Poisson de 0.30 para todas las capas.

Figura 34. Esquema del pavimento calculado AASTHO 93.



Fuente: Propia.

Tensión vertical máxima de  $49.77 \text{ psi} = 3.50 \text{ kgf/cm}^2$

Deformación en el pavimento es de  $6.8054 \text{ e-}04 \text{ pulg.} = 0.017272 \text{ mm}$ .

Deflexión del pavimento es  $2.9775 \text{ e-}02 \text{ pulg.} = 0.756412 \text{ mm}$ .

### 3.17. Cálculo para el dimensionamiento del pavimento articulado (Adoquín) por el método de Elementos Finitos.

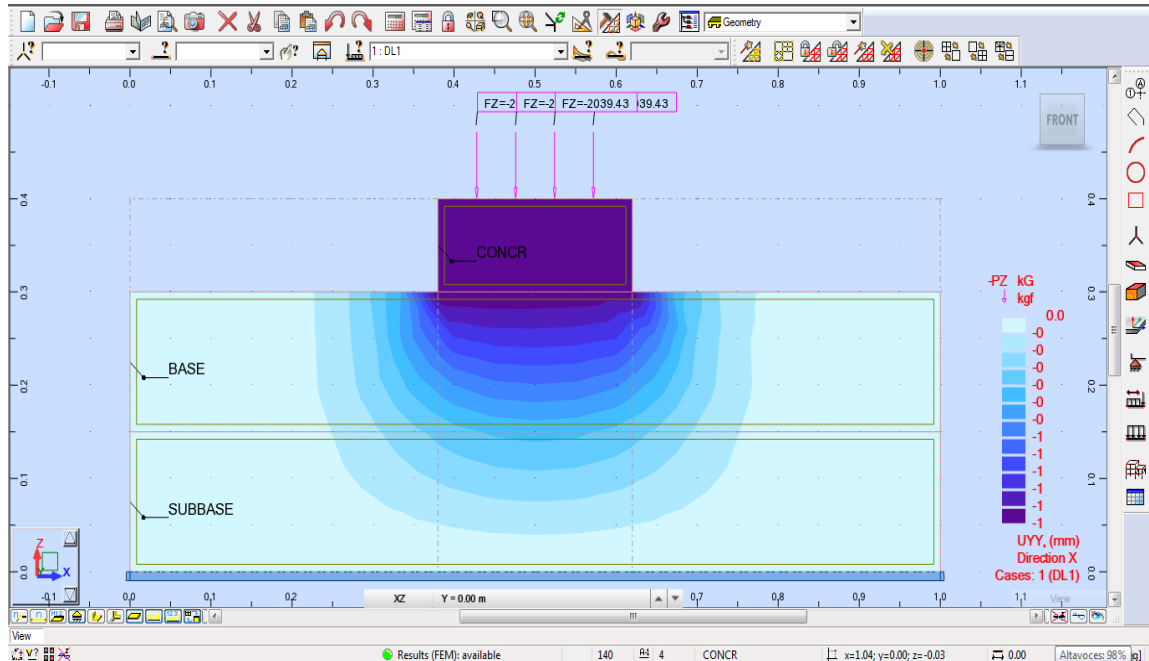
Peso específico de la base =  $2300 \text{ kgf/cm}^3$     Modulo de elasticidad =  $500 \text{ kgf/cm}^2$

Peso específico de la sub base =  $2300 \text{ kgf/cm}^3$     Modulo de elasticidad =  $800 \text{ kgf/cm}^2$

Peso aplicado al adoquín =  $80 \text{ KN}$     Coeficiente de Poisson =  $0,30$

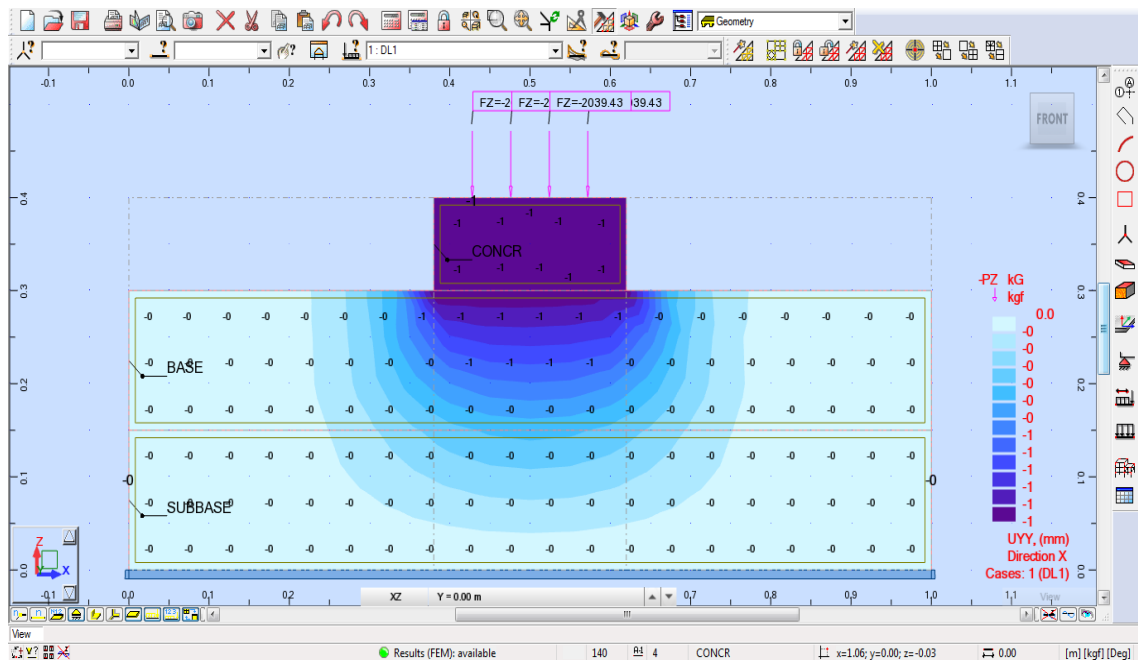
### 3.17.1. Cálculo mediante el software: AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL ANÁLISIS PROFESSIONAL 2016.

Figura 35. Desplazamiento en el eje Y representado con esquema de colores.



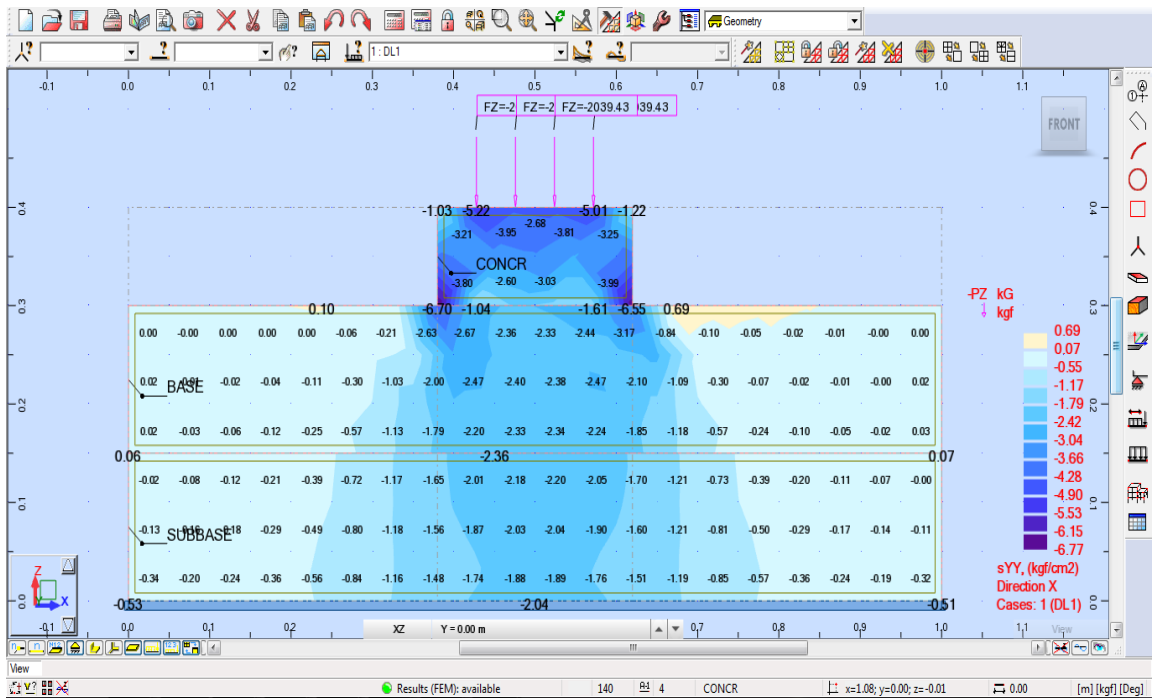
Fuente: Programa elementos finitos AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL.

Figura 36. Descripción de la deformación del paquete estructural.



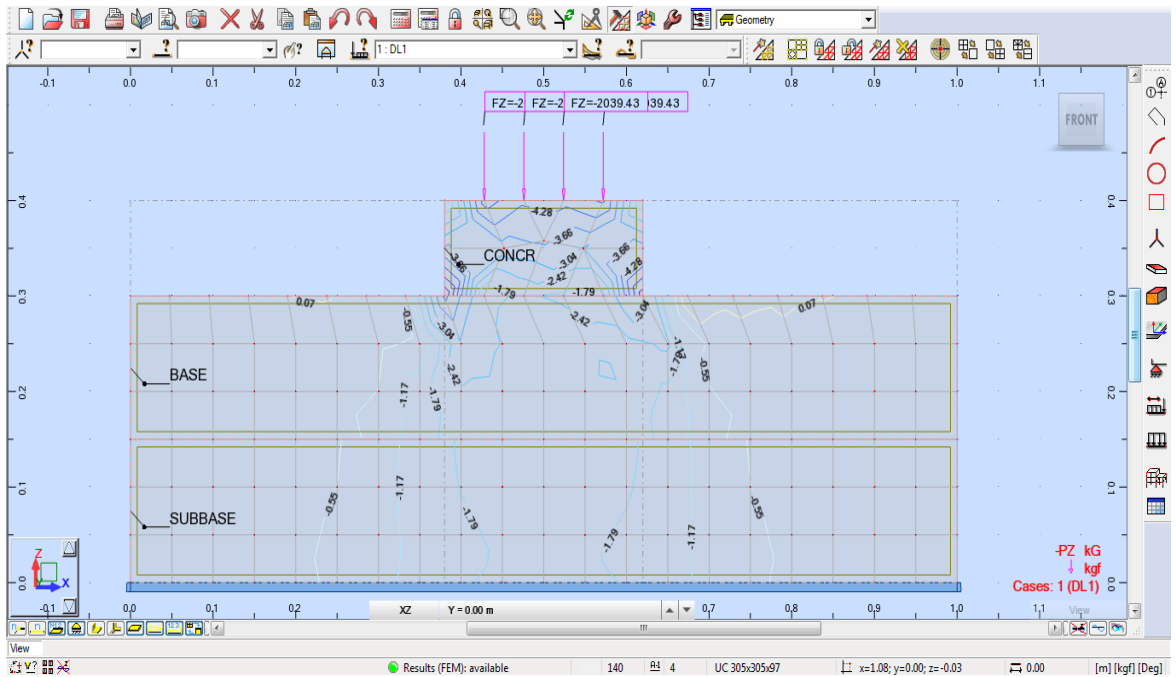
Fuente: Programa elementos finitos AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL.

Figura 37. Estado tensional dentro del paquete estructural de la vía.



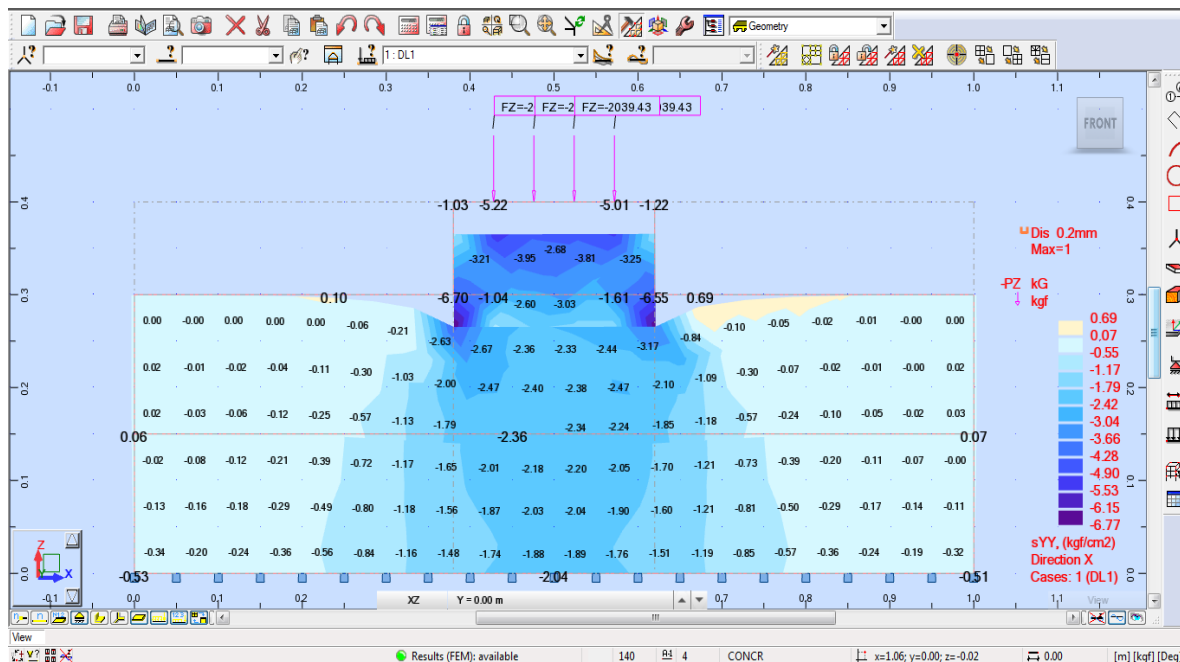
Fuente: Programa elementos finitos AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL.

Figura 38. Visualización de las isolíneas en el paquete estructural donde se muestra las curvas de igual tensión.



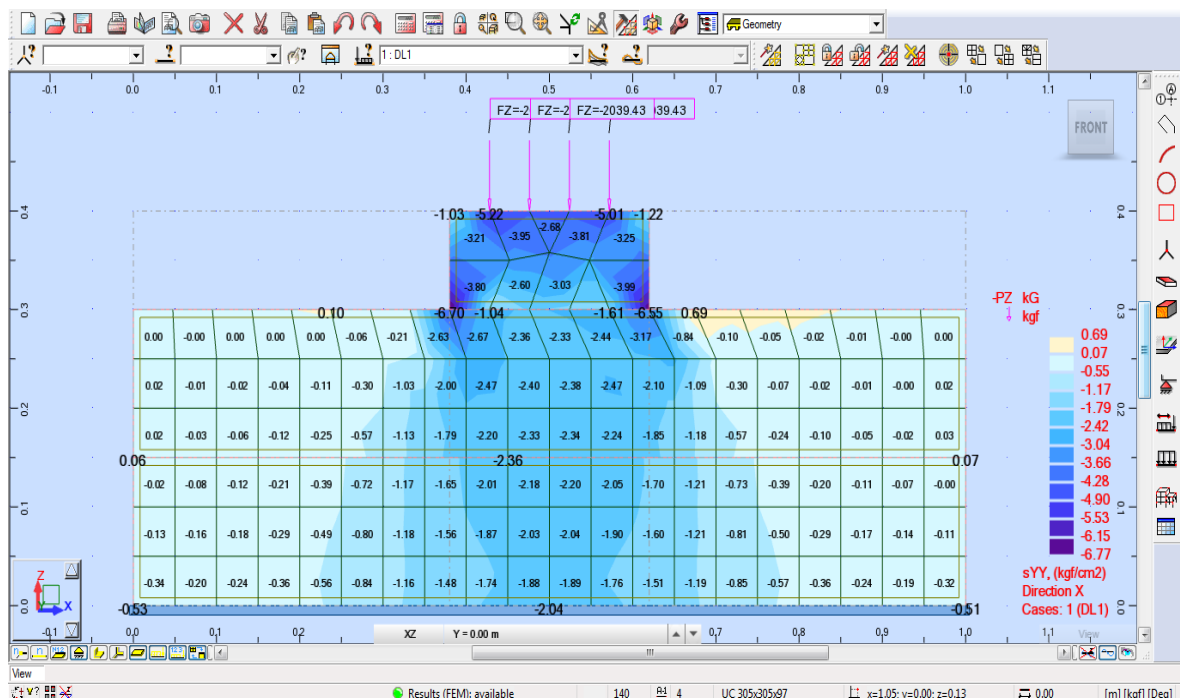
Fuente: Programa elementos finitos AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL.

Figura 39. Visualización mediante mapas de las deformaciones.



Fuente: Programa elementos finitos AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL.

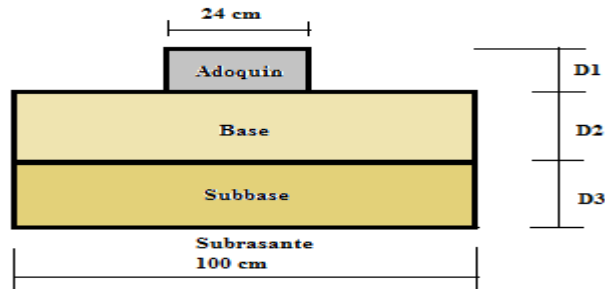
Figura 40. Visualización del enmallado de los elementos finitos mostrando el comportamiento del paquete estructural.



Fuente: Programa elementos finitos AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL.

Para el dimensionamiento de los espesores del pavimento con adoquines se realizó 4 diferentes cálculos de espesores tomando como referencia el cálculo obtenido por el método mecanicista para el pavimento con adoquín ya calculado, se optó por el más favorable que presentó una tensión máxima de 6.77 con un adecuado dimensionamiento de los espesores.

Figura 41. Dimensionamiento de las capas del pavimento con adoquín.



Fuente: Elaboración propia.

D1 = 10 cm. Adoquín.

D2 = 15cm. Base.

D3 = 15cm. Subbase.

#### Resumen de resultados de los dos métodos.

	Método mecanicista	Método Elementos Finitos.
<b>Adoquines:</b>	D1 = 10 cm.	D1 = 10 cm.
<b>Base:</b>	D2 = 15 cm.	D2 = 15 cm.
<b>Subbase:</b>	D3 = 20 cm.	D3 = 15 cm.

### 3.18. Análisis de costos del pavimento con adoquín.

Tabla 29. Análisis de precios unitarios y costos del pavimento articulado (adoquín) por el método mecanicista.

<b>Presupuesto (método mecanicista).</b>					
	<b>Descripción</b>	<b>Unid.</b>	<b>P.U.</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>
<b>I</b>	<b>Obras preliminares</b>				
1	Replanteo y control topográfico	m	5.33	550.00	2,931.50
<b>II</b>	<b>Pavimento articulado (adoquín)</b>				
2	Prov. y conf. de subbase	m <sup>3</sup>	148.91	660.00	98,280.60
3	Prov. y conf. de capa base	m <sup>3</sup>	170.96	495.00	84,625.20
4	Prov. y coloc. del adoquín	m <sup>2</sup>	267.66	3,300.00	883,278.00
					<b>1,069,115.30</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30. Análisis de precios unitarios y costos del pavimento articulado (adoquín) por el método elemento finito.

<b>Presupuesto (método elementos finitos).</b>					
	<b>Descripción</b>	<b>Unid.</b>	<b>P.U.</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>
<b>I</b>	<b>Obras preliminares</b>				
1	Replanteo y control topográfico	m	5.33	550.00	2,931.50
<b>II</b>	<b>Pavimento articulado (adoquín)</b>				
2	Prov. y conf. de subbase	m <sup>3</sup>	148.91	495.00	73,710.45
3	Prov. y conf. de capa base	m <sup>3</sup>	170.96	495.00	84,625.20
4	Prov. y coloc. del adoquín	m <sup>2</sup>	267.66	3,300.00	883,278.00
					<b>1,044,545.15</b>

Fuente: Elaboración propia.



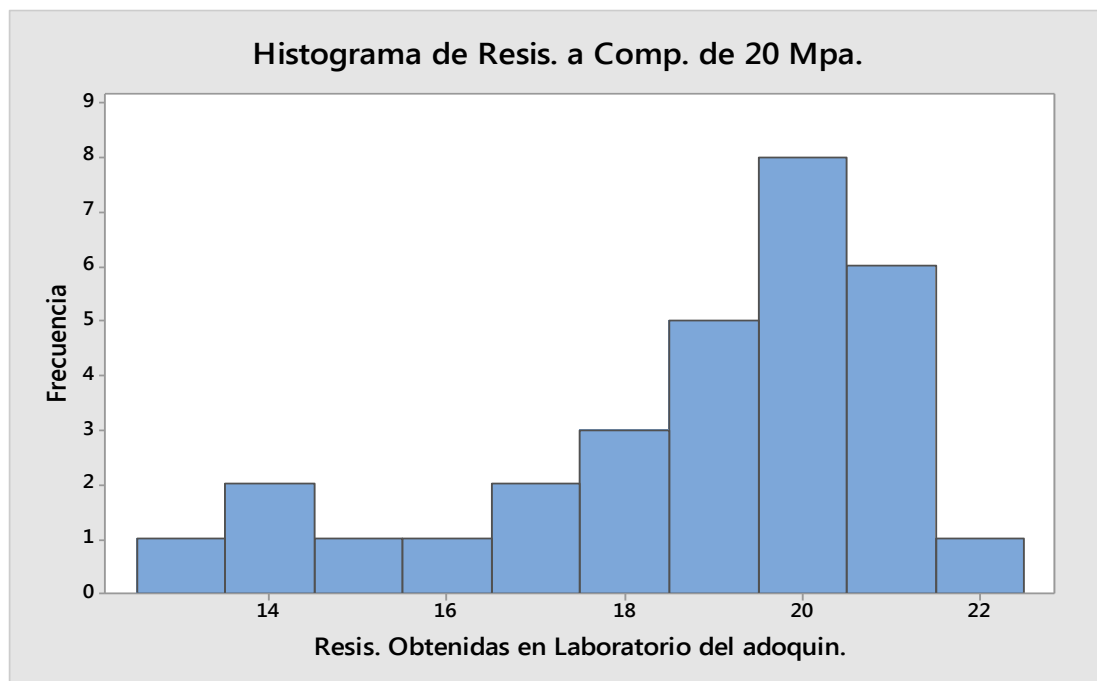
### 3.19. Estadística descriptiva de la resistencia a compresión del adoquín.

Tabla 31. Estadística descriptiva para la resistencia a compresión del adoquín a 20 Mpa (Concretec).

Variable	Resis. a Comp. 20 Mpa.
N° Adoquines	30
Media	<u>18.808</u>
Desviación Estándar	2.381
Varianza	5.671
Mediana	19.530
Valor Mínimo	13.216
Valor Máximo	21.88
Modo	19.8242, 20.1913

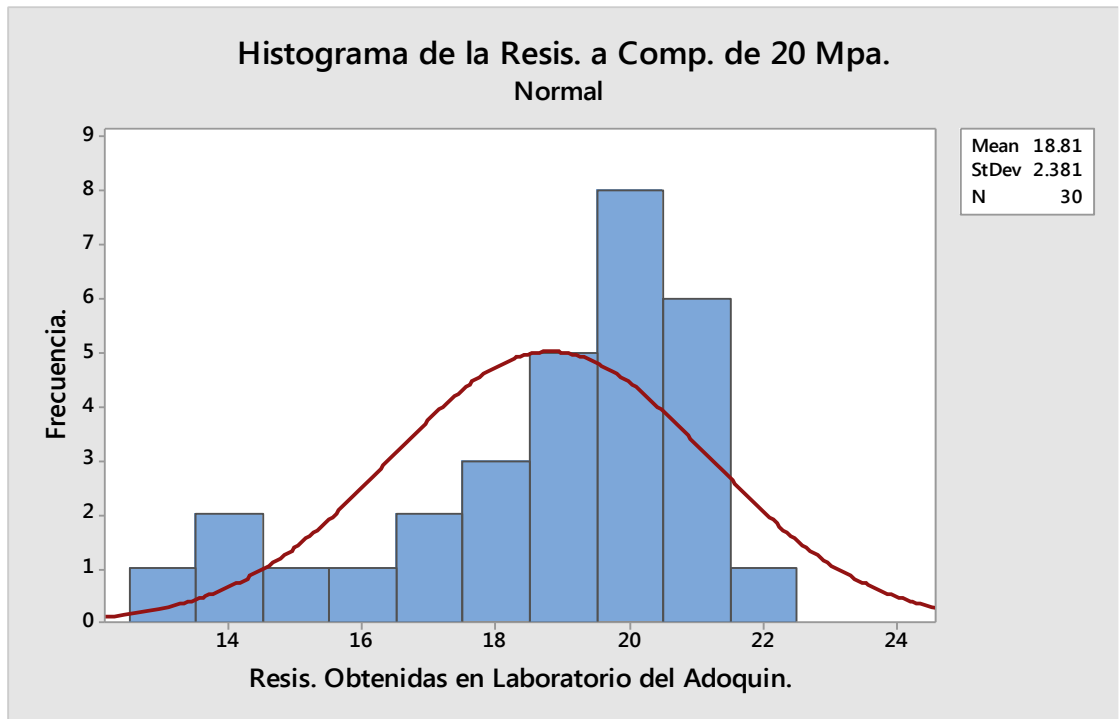
Fuente: Valores obtenidos del programa MiniTAB 17.

Gráfico3. Histograma de la resistencia a compresión del adoquín a 20 Mpa.



Fuente: histograma obtenido del programa MiniTAB 17.

Grafico 4. Distribución normal (Gauss) para la resistencia del adoquín.



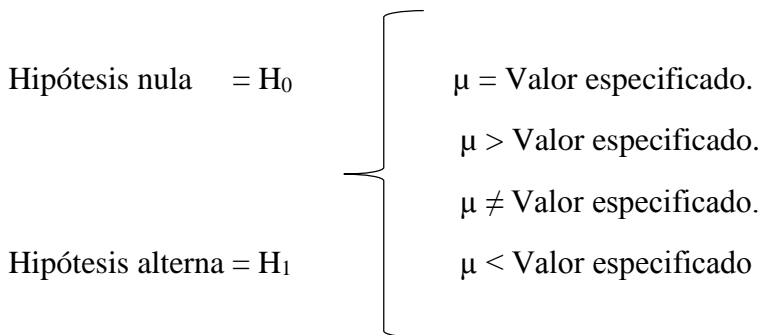
Fuente: Grafico obtenido del programa MiniTAB 17.

**3.20. Estadística inferencial de la resistencia a compresión del adoquín.**

La prueba t de una muestra determina si el promedio o la media de una muestra difieren significativamente de un valor específico.

**Donde:**

$\mu$  = Media de la muestra.



### 3.21. Variable de la resistencia a la compresión.

Tabla 32. Análisis estadístico para la resistencia a compresión del adoquín

(20 Mpa.)  $H_0: \mu = 20 \text{ Mpa}$  ;  $H_1: \mu \neq 20 \text{ Mpa}$

Muestra	Adoquín resistencia de 20 Mpa.
N	30
Media	18.808
Desviación estándar	2.381
Error estándar de la media	0.435
Límite inferior de 95% para $\mu$	17.956 , 19.660

Fuente: Valores obtenidos del programa MiniTAB 17.

#### Verificación de la prueba.

Hipótesis nula  $H_0: \mu = 20 \text{ Mpa}$ . Valor t = -2.74

Hipótesis alterna  $H_1: \mu \neq 20 \text{ Mpa}$ . Valor P = 0.006

Según el resultado de P para esta prueba nos da un valor menor a 0.05 por lo cual se rechaza la hipótesis nula para la resistencia del adoquín de 20 Mpa. con un nivel de confianza del 95%

Tabla 33. Análisis estadístico para la resistencia a compresión del adoquín

(20 Mpa.)  $H_0: \mu = 20 \text{ Mpa}$  ;  $H_1: \mu < 20 \text{ Mpa}$ .

Muestra	Adoquín resistencia de 20 Mpa.
N	30
Media	18.808
Desviación estándar	2.381
Error estándar de la media	0.435
Límite inferior de 95% para $\mu$	19.523

Fuente: Valores obtenidos del programa MiniTAB 17.

#### Verificación de la prueba.

Hipótesis nula  $H_0: \mu = 20 \text{ Mpa}$ . Valor t = -2.74

Hipótesis alterna  $H_1: \mu < 20 \text{ Mpa}$ . Valor P = 0.003

Según el resultado de P para esta prueba nos da un valor menor a 0.05 por lo cual se rechaza la hipótesis nula para la resistencia del adoquín de 20 Mpa. con un nivel de confianza del 95%

Tabla 34. Análisis estadístico para la resistencia a compresión del adoquín (20 Mpa.)  $H_0: \mu = 20 \text{ Mpa}$  ;  $H_1: \mu > 20 \text{ Mpa}$ .

Muestra	Adoquín resistencia de 20 Mpa.
N	30
Media	18.808
Desviación estándar	2.381
Error estándar de la media	0.435
Límite inferior de 95% para $\mu$	18.092

Fuente: Valores obtenidos del programa MiniTAB 17.

#### Verificación de la prueba.

Hipótesis nula  $H_0: \mu = 20 \text{ Mpa}$ . Valor t = -2.74

Hipótesis alterna  $H_1: \mu > 20 \text{ Mpa}$ . Valor P = 0.997

Según el resultado de P para esta prueba nos da un valor mayor a 0.05 y se aceptará la hipótesis nula para la resistencia del adoquín de 20 Mpa. con un nivel de confianza del 95%.

### 3.22. Estadística descriptiva de la subbase.

Tabla 35. Granulometría de la Subbase (AASHTO T-27)

3"	2"	1"	3/4"	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	L.I.	L.P.	I.P.	D.max.	Hum.Opt.	CBR 95%
100	98.9	74.8	67.7	54.4	38.8	26.3	17.4	8.8	18.9	13.0	6.0	2242	7.0	43.22
100	100	78.1	72.6	59.6	37.2	24.9	16.5	9.1	18.7	13.0	5.7	2248	7.1	42.12
100	100	77.8	66.6	54.1	36.9	25.8	16.2	8.5	19.0	13.1	5.9	2250	6.7	45.19

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. Análisis descriptivo de la Subbase.

Variable	Nº de Ensayos	Media	Desv. Est.	Varianza	Mediana	Valor Min.	Valor Max	Modo
3"	3	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2"	3	99.63	0.64	0.40	100.00	98.90	100.00	100.00
1"	3	76.90	1.82	3.33	77.80	74.80	78.10	*
3/4"	3	68.97	3.19	10.20	67.70	66.60	72.60	*
3/8"	3	56.05	3.12	9.73	54.42	54.08	59.65	*
Nº4	3	37.62	1.01	1.01	37.24	36.85	38.76	*
Nº10	3	25.64	0.73	0.53	25.75	24.85	26.30	*
Nº40	3	16.70	0.62	0.38	16.49	16.23	17.40	*
Nº200	3	8.79	0.33	0.11	8.77	8.47	3.13	*
L.I.	3	19.50	0.30	0.09	19.20	19.50	19.80	*
L.P.	3	12.87	0.15	0.02	12.70	12.90	13.00	*
I.P.	3	6.63	0.15	0.02	6.5	6.6	6.80	*
D.max.	3	2246.70	3.82	14.60	2248.10	2242.40	2249.70	*
Hum.Opt.	3	6.95	0.20	0.04	7.03	6.73	7.10	*
CBR 95%	3	<u>43.51</u>	1.56	2.42	43.22	42.12	45.19	*

Fuente: Valores obtenidos del programa MiniTAB 17

### 3.23. Estadística inferencial de la subbase.

Variable sobre la clasificación del suelo de acuerdo al CBR adecuado para un diseño de pavimentos por el método AASTHO 93 es de (20-50%) para un suelo bueno de subbase, tomaremos el valor mayor que es 50 % del CBR para nuestro análisis estadístico inferencial.

Tabla 37. Análisis estadístico inferencial de la Subbase.

$$H_0: \mu = 50 \% ; H_1: \mu \neq 50 \%$$

Muestra	CBR
N	3
Media	43.51
Desviación estándar	1.555
Error estándar de la media	0.898
Límite inferior de 95% para $\mu$	41.75 , 45.27

Fuente: Valores obtenidos del programa MiniTAB 17.

#### Verificación de la prueba.

Hipótesis nula  $H_0: \mu = 50 \%$  Valor t = -7.23

Hipótesis alterna  $H_1: \mu \neq 50 \%$  Valor P = 0.000

Según el resultado de P para esta prueba nos da un valor menor a 0.05 por lo cual se rechaza la hipótesis nula para nuestro CBR adecuado, con un nivel de confianza del 95%

Tabla 38. Análisis estadístico inferencial de la Subbase.

$$H_0: \mu = 50 \% ; H_1: \mu < 50 \%$$

Muestra	CBR
N	3
Media	43.51
Desviación estándar	1.555
Error estándar de la media	0.898
Límite inferior de 95% para $\mu$	44.987

Fuente: Valores obtenidos del programa MiniTAB 17.

#### Verificación de la prueba.

Hipótesis nula  $H_0: \mu = 50 \%$  Valor t = -7.23

Hipótesis alterna  $H_1: \mu < 50 \%$  Valor P = 0.000

Según el resultado de P para esta prueba nos da un valor menor a 0.05 por lo cual se rechaza la hipótesis nula para nuestro CBR adecuado, con un nivel de confianza del 95%

Tabla 39. Análisis estadístico inferencial de la Subbase.

$$H_0: \mu = 50 \% ; H_1: \mu > 50 \%$$

<b>Muestra</b>	<b>CBR</b>
<b>N</b>	3
<b>Media</b>	43.51
<b>Desviación estándar</b>	1.555
<b>Error estándar de la media</b>	0.898
<b>Límite inferior de 95% para <math>\mu</math></b>	42.033

Fuente: Valores obtenidos del programa MiniTAB 17.

**Verificación de la prueba.**

Hipótesis nula  $H_0: \mu = 50 \%$  Valor t = -7.23

Hipótesis alterna  $H_1: \mu > 50 \%$  Valor P = 1.00

Según el resultado de P para esta prueba nos da un valor mayor a 0.05 por lo cual se aceptara la hipótesis nula para nuestro CBR adecuado, con un nivel de confianza del 95%

### 3.24. Estadística descriptiva de la subrasante.

Tabla 40. Ensayos de suelos de la Subrasante.

3"	2"	1"	3/4"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°200	L.I.	L.P.	I.P.	D.max.	Hum.Opt.	CBR 95%
100.00	100.00	86.50	76.70	70.42	62.62	52.24	42.52	33.79	28.22	17.05	11.17	1926.43	11.90	11.38
100.00	100.00	91.70	79.90	69.31	61.07	52.68	43.39	33.03	29.27	16.04	13.23	1937.68	12.15	10.44
100.00	100.00	84.80	82.10	67.82	63.95	55.96	46.04	33.62	28.55	16.46	12.08	1936.04	12.03	10.12

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Análisis descriptivo de la Subrasante.

Variable	N° de Ensayos	Media	Desv. Est.	Varianza	Mediana	Valor Min.	Valor Max	Modo
3"	3	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2"	3	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1"	3	87.67	3.59	12.92	86.50	84.80	91.70	*
3/4"	3	79.57	2.72	7.37	79.90	76.70	82.10	*
3/8"	3	69.18	1.31	1.71	69.31	67.82	70.42	*
N°4	3	62.55	1.44	2.08	62.62	61.07	63.95	*
N°10	3	53.62	2.03	4.13	52.68	52.24	55.96	*
N°40	3	43.98	1.83	3.36	43.39	42.52	46.04	*
N°200	3	33.48	0.40	0.16	33.62	33.03	33.79	*
L.I.	3	19.10	0.20	0.040	28.90	29.10	29.30	*
L.P.	3	16.03	0.06	0.003	16	16	16.10	16
I.P.	3	13.03	0.15	0.02	12.9	13	13.2	*
D.max.	3	1933.40	6.08	37.00	1936.00	1926.40	1937.70	*
Hum.Opt.	3	12.03	0.13	0.02	12.03	11.90	12.15	*
CBR 95%	3	<u>10.65</u>	0.66	0.43	10.45	10.12	11.38	*

Fuente: Valores obtenidos del programa MiniTAB 17



### 3.25. Estadística inferencial de la subrasante.

La variable sobre la clasificación del suelo de acuerdo al CBR adecuado para un diseño de pavimentos por el método AASTHO 93 es de (7-20%) para un suelo regular de subrasante; tomaremos el valor mayor que son 20% del CBR para nuestro análisis estadístico inferencial.

Tabla 42. Análisis estadístico inferencial de la Subrasante.

$$H_0: \mu = 20 \% ; H_1: \mu \neq 20 \%$$

Muestra	CBR
N	3
Media	10.648
Desviación estándar	0.656
Error estándar de la media	0.379
Límite inferior de 95% para $\mu$	9.906 , 11.390

Fuente: Valores obtenidos del programa MiniTAB 17.

#### Verificación de la prueba.

Hipótesis nula  $H_0: \mu = 20 \%$  Valor t = -24.69

Hipótesis alterna  $H_1: \mu \neq 20 \%$  Valor P = 0.000

Según el resultado de P para esta prueba nos da un valor menor a 0.05 por lo cual se rechaza la hipótesis nula para nuestro CBR adecuado, con un nivel de confianza del 95%

Tabla 43. Análisis estadístico inferencial de la Subrasante.

$$H_0: \mu = 20 \% ; H_1: \mu < 20 \%$$

Muestra	CBR
N	3
Media	10.648
Desviación estándar	0.656
Error estándar de la media	0.379
Límite inferior de 95% para $\mu$	11.271

Fuente: Valores obtenidos del programa MiniTAB 17.

#### Verificación de la prueba.

Hipótesis nula  $H_0: \mu = 20 \%$  Valor t = -24.69

Hipótesis alterna  $H_1: \mu < 20 \%$  Valor P = 0.000

Según el resultado de P para esta prueba nos da un valor menor a 0.05 por lo cual se rechaza la hipótesis nula para nuestro CBR adecuado, con un nivel de confianza del 95%

Tabla 44. Análisis estadístico inferencial de la Subrasante.

$$H_0: \mu = 20 \% ; H_1: \mu > 20 \%$$

<b>Muestra</b>	<b>CBR</b>
<b>N</b>	3
<b>Media</b>	10.648
<b>Desviación estándar</b>	0.656
<b>Error estándar de la media</b>	0.379
<b>Límite inferior de 95% para <math>\mu</math></b>	10.025

Fuente: Valores obtenidos del programa MiniTAB 17.

### **Verificación de la prueba.**

Hipótesis nula  $H_0: \mu = 20 \%$  Valor t = -24.69

Hipótesis alterna  $H_1: \mu > 20 \%$  Valor P = 1.00

Según el resultado de P para esta prueba nos da un valor mayor a 0.05 por lo cual se aceptará la hipótesis nula para nuestro CBR adecuado, con un nivel de confianza del 95%

### **3.26. Análisis de los resultados obtenidos por los métodos mecanicista y elemento finito.**

Para este tipo de pavimentos se tomó los conceptos principales de un pavimento flexible apoyados siempre en las normas establecidas para el diseño como ser las normas AASTHO y ABC, tanto para el estudio de suelos como para el diseño específico del paquete estructural.

Si bien se hizo el cálculo para un pavimento flexible solo se lo realizó para tener una referencia del cálculo ya que en lo mencionado anteriormente estos tipos de pavimentos son similares en sus funcionamientos; se realizó el dimensionamiento del paquete estructural mediante dos métodos para posteriormente analizarlos y compararlos. Como primer método tomaremos el mecanicista en el cual tomamos valores basándonos específicamente en la norma AASHTO; para el diseño de pavimentos, se dimensionó los espesores por el método mecanicista, se consideró el módulo resiliente del adoquín de

2977053.851 Psi, CBR subrasante de 10.65% y subbase 43.51, estos datos con un previo análisis estadísticos para poder validar estos resultados de los CBR; con un tiempo de diseño para 20 años, un W18 de 1169237 con un número estructural calculado SN 3.68 obtuvimos los espesores de una capa de rodadura de 10cm, capa base de 15cm y capa subbase de 20cm, con esfuerzos de  $3.50 \text{ kgf/cm}^2$  de la carpeta asfáltica, con una deformación unitaria en tensión máxima en la fibra inferior de la carpeta asfáltica de 0.07272 mm y una deflexión de 0.756412 mm.

Para un mejor cálculo para el espesor del pavimento se realizó también un software denominado “AASHTO 1993” para el diseño de pavimentos el cual nos dio resultados similares, una vez obtenido los resultados del programa se utilizó estos; para una mayor confiabilidad de resultados, tomar en cuenta que en los casos calculados por el método mecanicista se adoptó medidas constructivas para el dimensionamiento de este pavimento. El método de los elementos finitos y su dimensionamiento del pavimento se lo realizó con la ayuda de un software el cual considera el peso específico del material, en este caso nuestro material que está entre arcilla, limo, grava y arena en su respectiva clasificación ya presentada, con un peso específico de  $2300 \text{ kgf/cm}^3$  para nuestra base y subbase; en este caso se utilizó un peso aplicado al adoquín de 80 KN dada por la norma AASTHO para un vehículo tipo; para el módulo de elasticidad tomaremos su transmisión de tensiones del material en este caso arcilla y limo basados también en su compresión que está en un rango de 40 – 100 (MN/m<sup>2</sup>), y por último se tomará el coeficiente de Poisson basado en la deformación axial para una arcilla con arena tomando un valor medio de 0.30 para el ingreso al programa. Ya con todos los datos ingresados al programa nos refleja un desplazamiento máximo en la parte central que es de 1; estos resultados son específicamente para un metro cuadrado de pavimento y un adoquín tipo doble “S”.

Para el cálculo de los espesores por el método de elementos finitos si bien no nos da resultados específicos de los espesores tenemos que analizar los esquemas que presenta el programa para poder tomar y confirmar el dimensionamiento colocado al programa donde nos muestra la deformación en un esquema de colores como y su estado tensional máximo representado en números y en un esquema de colores del programa; sin embargo se debe hacer los cálculos suficientes con distintas dimensiones tomando como referencia

el primer método y elegir el que presente un estado tensional adecuado para el paquete estructural que se desea calcular.

	Método mecanicista	Método Elementos Finitos.
Adoquines:	D1 = 10 cm.	D1 = 10 cm.
Base:	D2 = 15 cm.	D2 = 15 cm.
Subbase:	D3 = 20 cm.	D3 = 15 cm.

Tomando en cuenta todos los aspectos realizados en los dos métodos para poder dimensionar el paquete estructural por estas vías, se realizó el análisis correspondiente; vemos que ambos métodos son similares ya que prácticamente nos dimensionan espesores admisibles para estas vías; con el método mecanicista que es el más utilizado en nuestro medio basado en las norma AASHTO nos da resultados constructivos y coherentes para la aplicación en estos tramos para la pavimentación con adoquines, prácticamente este método según sus aspectos técnicos es la opción más confiable ya que se utiliza mayores datos como ser los módulos resilientes de cada material, periodo de diseño, la utilización de los ejes equivalentes, factores de confiabilidad, serviciabilidad, coeficientes estructurales de las diferentes capas basados en el CBR del material e incluso coeficientes de drenajes necesarios para las diferentes capas que tendrá la estructura del pavimento. Por todo lo mencionado, este método tiene gran valor de diseño para pavimentos.

En cuanto al método de elementos finitos si bien nos da un costo menor y esfuerzos mayores que los del método mecanicista debemos tomar muchos aspectos en cuenta; presenta características más a profundidad con el tema de esfuerzos y las deformaciones que pueda presentar el paquete estructural sobre todo con el material del adoquín; específicamente este software nos presenta desplazamientos en el eje y deformaciones en el paquete estructural, sus estados tensionales máximos que en este caso nos dio 6,77 kgf/cm<sup>2</sup> e incluso puede subir siempre teniendo en cuenta un pavimento constructivo, tiene una visualización del enmallado de los elementos finitos mostrados en el paquete estructural de la vía a diseñar; si bien este software al igual que otros similares carece de valores que son necesarios en un diseño de pavimentos como por ejemplo el CBR que es un valor fundamental para el diseño.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. Conclusiones del proyecto.

- ✓ Para poder identificar los tramos del proyecto es importante la visualización de la capa de rodadura de la vía, el estudio de tráfico y que estos sean representados por aforos realizados a la vía.
- ✓ Tomando en cuenta la ubicación de los tramos, el aforo realizado a las vías en estudio se determinó que están compuestas de un tráfico de media intensidad basado en el tránsito promedio diario y nuestros ejes equivalentes que se encuentran entre un rango 1000001-1500000 de tráfico (AASHTO 93).
- ✓ El tránsito de diseño de las vías en estudio da resultados representativos de 1169237 de ejes equivalentes de la calle Gabriel Lunda y 472302 de ejes equivalentes de la calle G.Zilvetty; se tomará la de mayor representatividad en los ejes equivalentes ya que estas cargas serán sometidas a nuestro pavimento en un periodo de diseño de 20 años.
- ✓ Las cargas que producen los diversos vehículos de diferentes pesos y cantidad de ejes, nos indica que ante esta variedad y a efecto de cálculo la norma AASHTO propone transformar 18000 lb (80 KN) de eje simple con rodado doble con neumáticos a la presión de 80lbs/pulg<sup>2</sup> los cuales fueron utilizados en los métodos.
- ✓ La característica principal de este tipo de pavimentos es el de exhibir un comportamiento similar a los pavimentos flexibles tradicionales, fundamentalmente en lo que se refiere a las propiedades de distribución de tensiones y desarrollo de deformaciones; estos pavimentos con adoquines no pueden considerarse rígidos pues si bien se producen momentos de flexión locales en la extensión de cada adoquín, estos se anulan en la junta con el adoquín vecino. Sin embargo, los adoquines no actúan independientemente. Existe una transmisión de esfuerzos a los adoquines vecinos por el esfuerzo de corte, esto existirá en la

medida que no supere en la magnitud al esfuerzo de fricción generado entre las paredes de los adoquines por la arena fuertemente comprimida entre ellos.

- ✓ Los aspectos técnicos en cuanto a las características de los esfuerzos y deformación del pavimento son diferentes la tensión máxima es debido a los valores y elementos tomados en cada método la variación; es significativa, de 3.50 kgf/cm<sup>2</sup> en el método mecanicista y de 6.77 kgf/cm<sup>2</sup> en el método de los elementos finitos debido prácticamente a que en el método de elementos finitos se tomó una determinada dimensión del pavimento y no así en el método mecanicista; esto también es debido a la variación en el módulo de elasticidad que se colocó en cada método sobre los materiales del pavimento.
- ✓ El suelo de la subbase está en un rango aceptable con una clasificación granulométrica de A-2-4 (0), un suelo que contiene grava mal graduada con arcilla y limo en las tres muestras obtenidas para esta capa, con porcentajes de plasticidad de un poco más del 6 % y con un porcentaje mínimo que pasa el tamiz 200. Estos resultados prácticamente son aceptables debido a que este suelo ya fue tratado en su pavimentación inicial, no obstante, existe una mezcla de los suelos compactados debido a los años que ya tiene la vía en estudio que a su vez a simple vista está cediendo a las cargas de los vehículos pese a su resistencia a la capacidad de soporte del suelo (CBR) que es más del 40% en las tres muestras para la subbase.
- ✓ La características que presenta la subrasante, está en un rango de regular a malo con una clasificación de A-2-6 (1) para todas las muestras; mencionar que es un suelo que contiene grava arcillosa-limosa con arena y un porcentaje de plasticidad mayor al 10% con un porcentaje considerable que pasa el tamiz 200 su CBR es menos al 12 % en las tres muestras de suelo para la subrasante; estos resultados básicamente son por los años que ya tienen las vías que ya concluyeron con sus periodos de diseño.
- ✓ El dimensionamiento del pavimento con materiales no convencionales por el método mecanicista es 10 cm en la capa de rodadura (adoquín), 15 cm en la capa de la base y 20 cm en la capa subbase; estos dimensionamientos están basados en los cálculos según la norma AASHTO 93, tomando en cuenta todos los aspectos técnicos que requiere el pavimento mostrados en el análisis del método.

- ✓ Para el cálculo por el método de elementos finitos se utilizó el software denominado “AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL ANÁLISIS PROFESSIONAL 2016” considerando valores como el peso específico del material que en este caso será de  $2300 \text{ kgf/cm}^3$  para nuestros suelos, el módulo de elasticidad y un coeficiente de Poisson de 0.30 , mientras el desplazamiento va de derecha a izquierda o viceversa como así también hacia abajo, la deformación de la masa del suelo se van disipando hasta volverse cero, el estado tensional dentro del suelo nos representa valores máximos que están próximos a la carga puntual del adoquín y mientras baja la tensión va disminuyendo sus valores existiendo saltos producidos por la rigidez del otro estrato o capa estructural haciendo notar la deformación y hundimiento del pavimento sometido a una carga puntual de 80 KN. Mediante este método se demostró cómo actúan los esfuerzos tensionales, deformaciones y desplazamientos en un área de un  $1\text{m}^2$  con un adoquín de longitud de 12cm por 24 cm y una altura de 10 cm los cuales nos sirvieron para este análisis.
- ✓ Para el dimensionamiento de los espesores del pavimento con adoquines por el método de elementos finitos se realizó 4 diferentes cálculos de espesores tomando como referencia el cálculo obtenido por el método mecanicista para el pavimento con adoquín ya calculado; se optó por el más favorable que presentó una tensión máxima de 6.77 con un adecuado dimensionamiento de los espesores los cuales son; capa de rodadura de 10cm, capa base 15cm y capa subbase de 15cm.
- ✓ Sobre el análisis de costos y precios unitarios realizado para estas vías el método mecanicista tiene un costo superior al del elemento finito debido a los espesores obtenidos en cada método ya que hay una diferencia de 5cm en la capa subbase del método de elementos finitos; se puede decir que en el tema económico el método elementos finitos es más factible para estos tramos.
- ✓ El análisis comparativo de estos dos métodos da como resultado que el dimensionamiento del método de los elementos finitos es menor al del método mecanicista; en cuanto a los esfuerzos presentan una notable diferencia casi del 50% debido al longitud que se tomó en el método de los elementos finitos y a diferencia de los módulos de elasticidad de ambos métodos ya que se tomó para el cálculo de los esfuerzos la misma carga de 80 KN y un coeficiente de Poisson

de 0,30 en ambos métodos; los costos son diferentes por el dimensionamiento que presenta cada método es decir que el método de elementos finitos es más económico en referencia al método mecanicista.

- ✓ Por todo lo analizado en ambos métodos se llegó a la conclusión que el método mecanicista consta de elementos estructurales, factores y coeficientes muy importantes para el dimensionamiento de pavimentos los cuales pueden ser muy efectivos para el diseño de pavimentos con materiales no convencionales.
- ✓ Con el análisis que se realizó al método de elementos finitos se llegó a la conclusión de que este método es más de verificación de aspectos técnicos muy importantes como ser de esfuerzos y deformaciones de un pavimento, los cuales con estudios más a profundidad y con apoyo de otros métodos sobre el dimensionamiento de pavimentos se podrá conseguir resultados efectivos y acordes a los aspectos técnicos que requiera un pavimento de estas características.

#### **4.1. Recomendaciones del proyecto.**

- ✓ Tener mucho cuidado en el aforo de los vehículos que transitan por las vías, ya que de ello depende el cálculo de los ejes equivalentes para el dimensionamiento del pavimento.
- ✓ Tener en cuenta todas las normas con las cuales se trabaja en el proyecto ya que de esto dependerá la realización adecuada del mismo.
- ✓ Se debe tener mucho cuidado con el material adquirido para la realización del pavimento no convencional (adoquín), realizando las pruebas de laboratorio ya que en este caso en particular nos presentó el material adquirido de la empresa CONCRETEC que nos da un valor sobre sus especificaciones técnicas de 20 Mpa de resistencia a la compresión; sin embargo, realizando los ensayos de compresión a 30 unidades de este material pocos llegaron a cumplir esa especificación. Para este proyecto se calculó 18.808 Mpa tomando la media de estos resultados apoyados en un análisis estadístico, es por eso que se debe verificar y constatar las especificaciones técnicas que los materiales presenten.



- ✓ Se recomienda adoptar espesores adecuados y constructivos para el dimensionamiento de los pavimentos ya que por el método mecanicista utilizando el software nos dio valores referenciales como ser de capa de rodadura de 13.97 cm, capa base de 15.24 cm y capa subbase de 15.24 cm; estos datos deberán ser modificados y analizados para un pavimento constructivo.
- ✓ Se deberá tomar en cuenta los valores que se utilizarán en ambos métodos ya que de esto dependerá un buen desarrollo de los cálculos para el pavimento articulado, conocer para qué tipo de tráfico será diseñado y tomar todos los valores de acuerdo a las normas y especificaciones requeridas para el dimensionamiento.
- ✓ Para (a1) de la curva de asfaltos para el módulo elástico, se recomienda adoptar el máximo dato a obtener por la curva del módulo elástico que viene a ser 0.46 en este caso específico según el tipo de material que será utilizado.
- ✓ Se recomienda consultar e indagar con laboratorista de suelos y especialista en geotecnia para así realizar una correcta modelación del paquete estructural de la vía si se utilizará el método de elementos finitos.
- ✓ Si se utilizará este método con este software se recomienda tomar varios dimensionamientos tomando como referencia el calculado con el método mecanicista y obtener el mejor que presente un estado tensional adecuado basado en los esquemas que presente el cálculo sobre los desplazamientos y deformaciones; en este caso en particular se realizó 4 cálculos con diferentes espesores del pavimento.
- ✓ Para la verificación de las especificaciones técnicas del material adoquín se debe contar con instrumentos en laboratorio adecuados para no tener errores en las apreciaciones de los resultados ya que estos son primordiales en los cálculos que se realizaran en todo el proyecto.
- ✓ Se recomienda que si se utilizara programas de elementos finitos para el cálculo de diseño representados en los esfuerzos y deformaciones sobre un pavimento es necesario introducir datos constructivos que representen lo más cercano posible al comportamiento que experimenta cada uno de los materiales que componen la estructura del pavimento a diseñar.

- ✓ Se debe realizar indagaciones más profundas sobre ambos métodos para obtener resultados efectivos, relacionar ambos métodos para poder obtener mejores dimensionamientos de los pavimentos con materiales no convencionales.