

## **CAPITULO I INTRODUCCIÓN**

### **1.1.- Generalidades**

El pavimento es la superficie de rodamiento para los distintos tipos de vehículos, formada por el agrupamiento de capas de distintos materiales destinados a distribuir y transmitir las cargas aplicadas por el tránsito al cuerpo de terraplén. Existen dos tipos de pavimentos: los flexibles (de asfalto) y los rígidos (de concreto hidráulico). La diferencia entre estos tipos de pavimentos es la resistencia que presenta a la flexión.

Lo que nos interesa en la investigación realizada es el pavimento rígido; el cual se conforma por una sub-base y por una losa de concreto hidráulico, la cual le va a dar una alta resistencia a la flexión. Además de los esfuerzos a flexión y de compresión, este pavimento se va a ver afectado en gran parte los esfuerzos que tenga que resistir al expandirse o contraer por cambios de temperatura y por las condiciones climáticas.

Los métodos de diseño abordados en la investigación son los recomendados por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en su versión de 1993 como método empírico, la Portland Cement Association (PCA) edición de 1984 y KENPAV Y WESTERGAARD como métodos mecanicistas, y AASHTO en su versión 2008 como método empírico-mecanicista, ya que son las metodologías que más se utilizan por los organismos encargados de la gestión de carreteras en nuestro país y a nivel regional.

A lo largo del proyecto se hace un llamado al interés en la investigación y tenga confianza en utilizar las distintas metodologías en el dimensionamiento de pavimento rígido, para nuestro medio.

### **1.2.- Problema**

En nuestro país y en la mayoría de países latinoamericanos, el diseño de las estructuras de pavimentos rígidos es realizado utilizando las recomendaciones establecidas en la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento AASHTO (American Association of

State Highway and Transportation Officials) edición de 1993, la cual corresponde a una metodología empírica, que tiene sus fundamentos principalmente en la prueba AASHO Road Test (American Association of State Highway Officials), desarrollada en la década de 1960. Sin embargo, existen otros métodos de diseño para estructuras de pavimento rígido que no han sido muy utilizados, tal como los métodos mecanicistas desarrollado por la Portland Cement Association (PCA) edición 1984 y el KENPAV y WESTERGARD y empírico-mecanicista como AASTHO (American Association of State Highway Officials) 2008.

Cabe indicar que se ha utilizado el empirismo, debido a la falta o incerteza de conocimientos sobre el comportamiento de los diferentes elementos y/o materiales que conforman una estructura de pavimento rígido.

Por lo anterior mencionado se considera importante realizar un análisis comparativo de las metodologías empíricas, mecanicistas y empírica-mecanicistas de mayor y menor uso en pavimentación rígida, partiendo desde sus criterios de diseño, datos de entrada, procesamiento y resultados, así como evaluar las ventajas y limitantes en su aplicación de los mismos.

### **1.3.- Justificación**

Los métodos empíricos tanto en el diseño de pavimentos rígidos como flexible, son todavía la técnica más usada para establecer tipos y espesores de capas de pavimentos de carreteras y vías urbanas. Actualmente se están introduciendo métodos mecanicistas, éstos requieren una importante cantidad de información difícil de obtener, además de la necesaria calibración, que demandará todavía varios años para poder ser implementada.

Si bien la bibliografía existente y las normas de varios países establecen la metodología a seguir en el dimensionamiento de los pavimentos rígidos ya sean estos empíricos, mecanicistas o empírico-mecanicistas, los mismos no establecen con claridad ventajas y desventajas de cada uno de los métodos y menos aun cuando se aplican a proyectos específicos de nuestro medio.

Lo que se pretende alcanzar son las diferencias y ventajas en lo que se refiere a las metodologías de diseño de pavimento rígido, por ello es muy importante realizar un análisis valorativo de los diferentes métodos aplicados en proyectos de la región que finalmente nos den las pautas técnicas necesarias para que los proyectistas puedan elegir con mayor convicción y certidumbre un método considerando el más adecuado para su aplicabilidad en el medio, porque como ingenieros estamos comprometidos a elaborar trabajos de calidad bien fundamentados.

Los resultados que se esperan obtener servirán de análisis y valoración por los diferentes ingenieros proyectistas de manera que tengan a mano las causales de ventajas y desventajas en cada uno de los métodos considerando su aplicabilidad en nuestro medio.

#### **1.4.- Objetivos**

##### **1.4.1.- Objetivo General**

Realizar un análisis valorativo sobre las ventajas y desventajas de la aplicabilidad de los métodos empíricos como el AASTHO 93, mecanicista como el PCA 1984 y KENPAV y WESTERGARD y empírico-mecanicista como AASTHO 2008 a objeto de evidenciar los aspectos que deben regir como proyectistas al momento de elegir un método para el dimensionamiento de pavimentos rígidos.

##### **1.4.2.- Objetivos Específicos**

- Analizar las propiedades de los pavimentos rígidos.
- Analizar las metodologías sobre el dimensionamiento de espesores para estructuras de pavimentos rígidos.
- Identificar los parámetros o variables más incidentes en cada uno de los métodos de diseño para estructuras de pavimento rígido.
- Realizar un cuadro comparativo de las diferencias de los distintos métodos estudiados de diseño de pavimento rígido.

- Establecer a partir de los resultados conclusiones y recomendaciones sobre la investigación.

### **1.5.- Alcance**

El presente estudio tendrá como finalidad hacer extensivo la aplicación del método a seguir, a todo profesional dedicado a esta labor y en especial va dirigido al profesional técnico, para que dicho método pueda ser de utilización práctica y sencilla. Se realiza en este trabajo el dimensionamiento de pavimento rígido utilizando las diferentes metodologías empíricas, mecanicistas y empírica-mecanicistas. Se recabará toda la información necesaria de los parámetros de diseño que se consideren más apropiados para su aplicación, posteriormente se procederá al estudio teórico y práctico de los datos de entrada y los resultados obtenidos. Una vez realizados los estudios correspondientes se podrán elaborar las conclusiones y recomendaciones las cuales evidenciarán los aspectos que deben regir como proyectistas al momento de elegir un método para el dimensionamiento de pavimentos rígidos.

En primera instancia estudiaremos las propiedades y características de los pavimentos rígidos, tipos de pavimentos así como las variables en el diseño de dicho pavimento.

Seguidamente analizaremos los métodos de dimensionamiento de pavimento rígido, haciendo una reseña histórica de cada uno, sus factores o parámetros de diseño y su flujograma de diseño, para tener un amplio conocimiento de cada uno.

Se hará una valoración de las ventajas y desventajas desde sus datos de entrada, procesamiento y resultados.

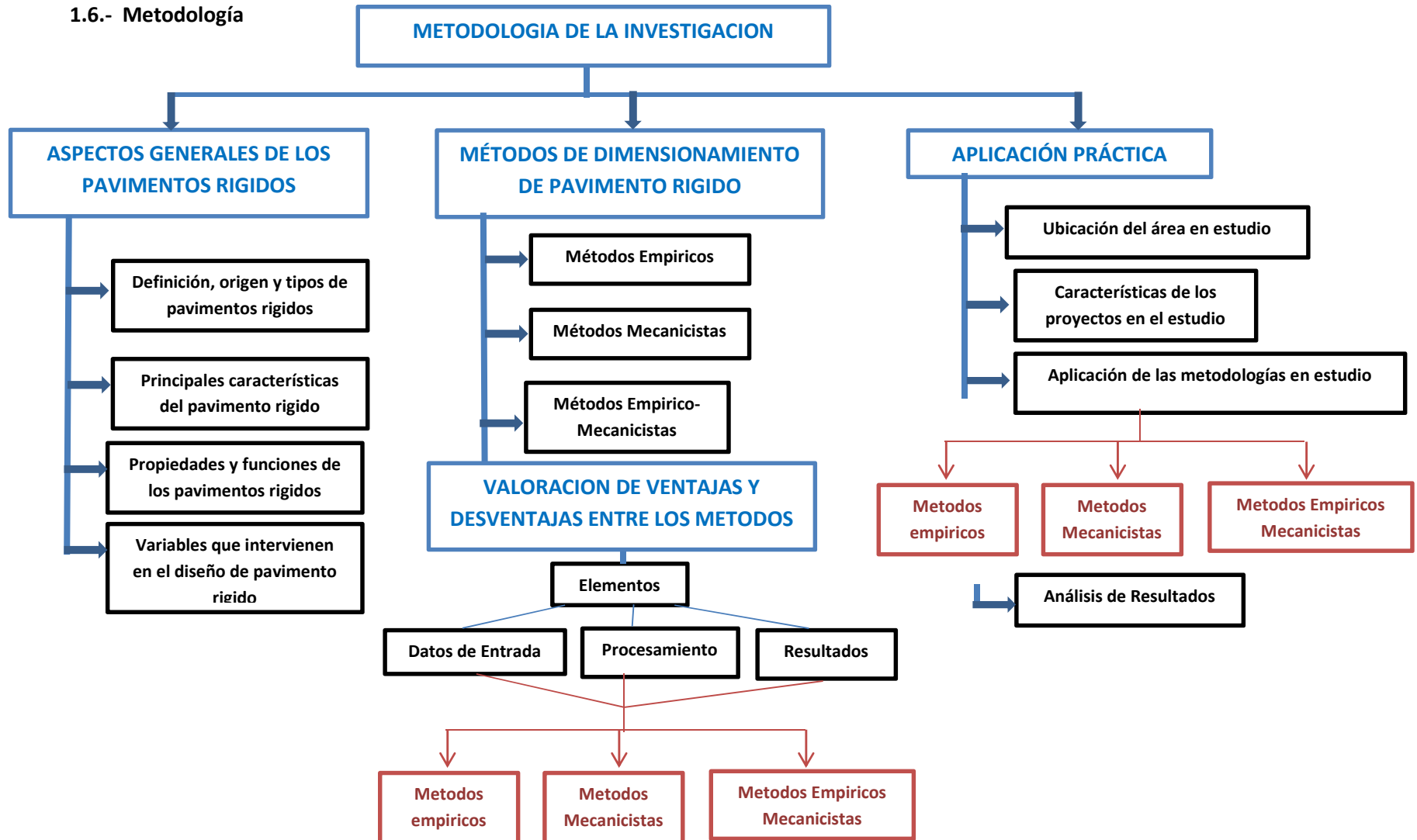
Luego se dará paso a la aplicación práctica con el conocimiento adquirido en la parte teórica, y con ayuda de programas computacionales para las diferentes metodologías estudiadas previamente, que nos facilitaran los cálculos podremos llegar a los resultados esperados.

De acuerdo a los resultados que se obtengan, de la recolección de información que estará destinado a facilitar y uniformar criterios en la posterior valoración técnica del

resultado se realizara un análisis comparativo de los valores obtenidos por los diferentes métodos de diseño estudiados para poder determinar cuáles son sus ventajas y desventajas.

Finalmente, se rescataran todas las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron a lo largo del desarrollo del proyecto, tanto en su parte teórica como en la práctica, para dejar un registro de datos y resultados que pueden ser de mucho beneficio para otros estudiantes o personas que requieran información sobre el tema de investigación.

## 1.6.- Metodología



## **CAPÍTULO II**

### **ASPECTOS GENERALES DEL PAVIMENTO RÍGIDO**

#### **2.1. Introducción a los pavimentos**

La arquitectura ha empleado a lo largo de la historia múltiples pavimentos con carácter decorativo. Uno de los medios más comunes ha sido utilizar grandes losas de piedras ornamentales como mármol, travertinos, basalto o jaspe. Otros se han basado en las labores complejas sobre maderas nobles, taraceadas con habilidad para componer parques o tarimas. Pero entre todos ellos destacan por su carácter único los pavimentos romanos y bizantinos de mosaico, compuestos por pequeñas piezas de cristal o mármol llamadas teselas.

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las subrasante además de que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza, y por consecuencia resultan los más económicos.

La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo

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

La clasificación de pavimentos está sujeta a las limitaciones inherentes a las técnicas de clasificación. Históricamente, los pavimentos han sido divididos en dos categorías:

- ✓ Pavimentos flexibles: Consiste de una superficie de desgaste o carpeta relativamente delgada construida sobre unas capas (Base y Sub-base), apoyándose este conjunto sobre la subrasante compactada, de manera que la sub-base, base y superficie de desgaste o carpeta son componentes estructurales de este tipo de pavimento (Ver figura 2.1).
- ✓ Pavimentos Rígidos: Consiste en una losa de concreto hidráulico y pueden o no tener una capa sub-base entre la losa y la subrasante (Ver figura 2.2).

A parte de los tipos de pavimentos ya citados existe actualmente el llamado semirígido que es, esencialmente, un pavimento flexible a cuya base se le ha dado una rigidez alta por la adición de cemento o asfalto.

**Figura 2.1.- Camino con estructura de pavimento flexible**



**Figura 2.2.- Camino con estructura de pavimento rígido**



De lo anterior se desprende que, en general, un pavimento está formado por diversas capas de mejor calidad y mayor costo cuanto más cercanas se encuentran a la superficie de rodamiento; ello es, principalmente por la mayor intensidad de los esfuerzos que le son transmitidos.

Algunos autores consideran que los pavimentos se diferencian y definen en términos de los materiales de que están constituidos y de cómo se estructuran esos materiales.

Mientras que otros consideran que la diferencia esencial es la manera en que distribuyen las cargas sobre la subrasante.

## **2.2. Objetivo de los pavimentos**

Los principales objetivos de los pavimentos son tres: estructurales, funcionales y de seguridad.

**Estructural:** el pavimento sirve para distribuir las cargas bajo las ruedas de los vehículos sobre áreas suficientemente amplias como para evitar tensiones (superiores a su capacidad) en la capa inferior del pavimento.

La carga de la rueda sobre la superficie del pavimento se aplica en un área muy reducida, causando grandes tensiones. Sin embargo estas tensiones van disminuyendo con la profundidad: el nivel de tensiones disminuye desde la capa superior a la inferior en las estructuras de pavimento.

**Funcional:** La estructura del pavimento está relacionada con los requisitos del usuario de un andar suave y confortable.

La calidad de manejo se mide en términos de **Índice de Serviciabilidad Presente** (PSI), concepto desarrollado por la American Association of State Highway Officials (AASHTO). PSI se mide principalmente según la **rugosidad** del terreno referida a los deterioros producidos por el uso y edad de los pavimentos y es uno de los criterios utilizados para la toma de decisiones respecto al mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción de pavimentos.

Los típicos deterioros de los pavimentos son: fisuras longitudinales y/o transversales, roturas, bacheos y ahuellamientos que afectan la integridad estructural de los pavimentos y el nivel de servicio.

**Seguridad:** Relacionada con el desarrollo de la **resistencia friccional** y la interacción pavimento-rueda. La fricción se asegura con la elección de los materiales y diversos tratamientos superficiales (por ejemplo texturizado). Otra característica relacionada con la seguridad es la **reflectividad** de la superficie del pavimento.

### **2.3. Definición del pavimento rígido**

Se define como pavimento de hormigón el constituido por un conjunto de losas de hormigón en masa separadas por juntas transversales, o por una losa continua de hormigón armado, en ambos casos eventualmente dotados de juntas longitudinales; el hormigón se pone en obra con una consistencia tal, que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación y maquinaria específica para su extensión y acabado superficial.

Un pavimento se puede definir como la superestructura de la obra vial que hace posible la circulación de los vehículos con la comodidad, seguridad y economía requeridos por el usuario y previstos en el proyecto. En general está constituido por un conjunto de capas superpuestas, compuestas por materiales seleccionados, sometidos a algún tratamiento, las cuales quedan comprendidas entre el nivel superior de la subrasante, la superficie de rodamiento cuyo comportamiento depende de la calidad del tipo de materiales, de su espesor y disposición en la estructura de los pavimentos así como de la calidad de la construcción.

El pavimento rígido tiene como elemento estructural fundamental una losa de concreto, esta se apoya sobre una capa de material seleccionado, a la que se le da el nombre de subbase; cuando la subrasante del pavimento tenga una calidad suficiente buena, la losa de concreto puede colocarse directamente sobre ella, prescindiéndose así de una subbase especial; de lo que se trata es de que la losa de concreto tenga un apoyo suficientemente uniforme y estable. Debido a que el módulo de elasticidad del concreto es mucho mayor que el correspondiente a los materiales que le sirven de apoyo, la mayor parte de la capacidad de carga del pavimento procede de la propia losa, efecto que es conocido como acción de viga. Las losas de concreto hidráulico deben resistir, además de los esfuerzos provocados por el tránsito, los producidos por cambios de temperatura y humedad, así como por cambios volumétricos de los materiales que les sirven de apoyo.

En términos generales, puede decirse que las características estructurales de las losas dependen fundamentalmente de su espesor y de la calidad del concreto empleado,

interviniendo en esta última y en forma primordial la resistencia a la tensión, sin olvidar que la resistencia al desgaste superficial juega un papel muy importante. Un factor que merece atención son las juntas que dividen las losas, ya que de su apropiado diseño y construcción depende no solo la adecuada transmisión de cargas entre las losas sino también, y de una manera fundamental, la calidad de rodamiento y su desempeño futuro.

#### **2.4. Tipos de pavimentos rígidos o pavimentos de concreto hidráulico**

Existen varios tipos de pavimentos rígidos o de concreto hidráulico a continuación se realiza un detalle de distintos tipos:

- ✓ Pavimentos de Concreto Hidráulico Simple (PCH S).
  - a) Sin elementos de transferencia de carga.
  - b) Con elementos de transferencia de carga.
- ✓ Pavimentos de Concreto Hidráulico con Refuerzo de Acero (PCH RA).
  - a) Con refuerzo de acero no estructural.
  - b) con refuerzo de acero estructural.
- ✓ Pavimentos de Concreto Hidráulico con Refuerzo Continuo (PCH RC).
- ✓ Pavimentos de Concreto Hidráulico Pre o Postensado (PCH PP).
- ✓ Pavimentos de Concreto Hidráulico Reforzado con Fibras (PCH RF).

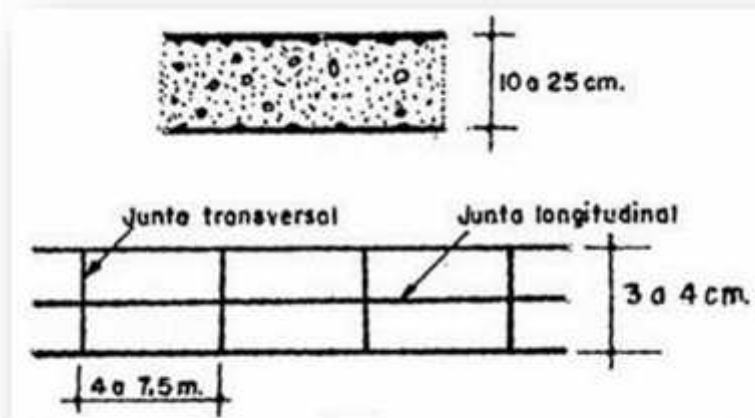
##### **Pavimentos de concreto hidráulico simple (PCH S)**

El concreto asume y resiste las tensiones producidas por el tránsito y las variaciones de temperatura y humedad.

##### **a) Sin elementos de transferencia de carga**

Aplicación: Tráfico Ligero, clima templado y se apoya sobre la sub-rasante, en condiciones severas requiere del Cimiento granular y/o tratado, para aumentar la capacidad de soporte y mejorar la transmisión de carga.

**Figura 2.3.- PCH S sin elementos de transferencia de carga**

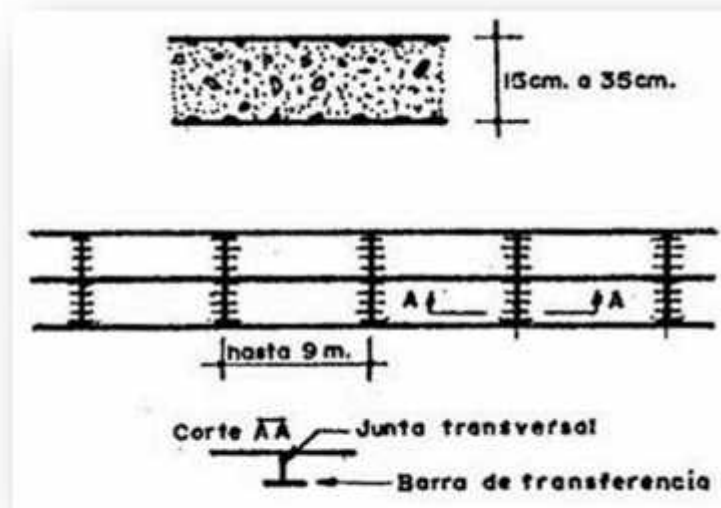


**b) Con elementos de transferencia de carga.**

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

Aplicación: Tráfico mayor de 500 Ejes equivalentes de 18 Kips.

**Figura 2.4.- PCH S con elementos de transferencia de carga**



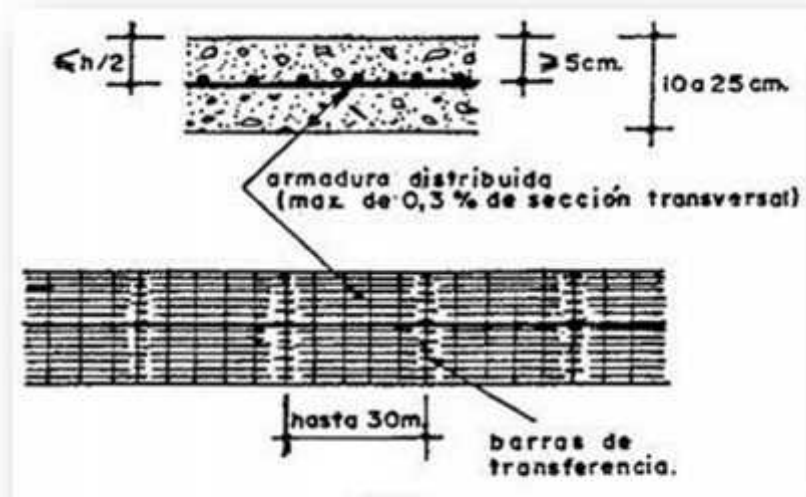
## Pavimentos de concreto hidráulico con refuerzo de acero (PCH RA)

### a) Pavimentos de concreto hidráulico con refuerzo de acero no estructural

El refuerzo no cumple función estructural, su finalidad es resistir las tensiones de contracción del concreto en estado joven y controlar los agrietamientos. Tienen el refuerzo de acero en el tercio superior de la sección transversal a no menos de 5cm. Bajo la superficie. La sección máxima de acero es de 0.3% de la sección transversal del pavimento.

Aplicación: Es restringida, mayormente a pisos Industriales.

**Figura 2.5.- PCH RA no estructural**

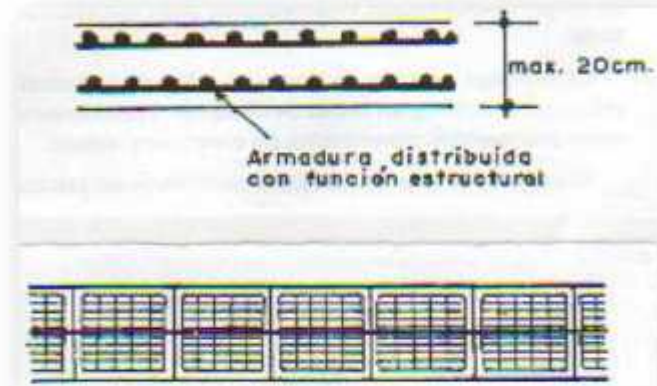


### b) Pavimentos de concreto hidráulico con refuerzo de acero estructural.

El refuerzo de acero asume tensiones de tracción y compresión, por lo que es factible reducir el espesor de la losa hasta 10 o 12 cm.

Aplicación: Pisos Industriales, las losas resisten cargas de gran magnitud.

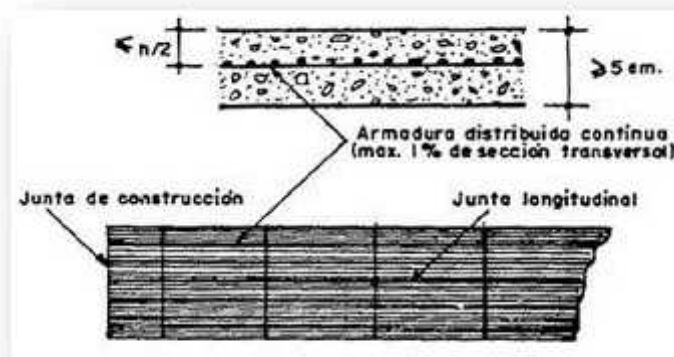
**Figura 2.6.- PCH RA estructural**



**Pavimentos de concreto hidráulico con refuerzo continuo (PCH RC)**

El refuerzo asume todas las deformaciones, en especial las de temperatura, eliminando las juntas de contracción, quedando solo las juntas de construcción y de dilatación en la vecindad de alguna obra de arte. La fisura es controlada por una armadura continua en el medio de la calzada, diseñada para admitir una fina red de fisuras que no comprometan el buen comportamiento de la estructura del pavimento. Aplicación: En la Parkway USA, zonas de clima frío, recubrimientos en pavimentos deteriorados

**Figura 2.7.- PCH RC**



### **Pavimentos de concreto hidráulico pre o pos tensado (PCH PP)**

Su desarrollo es limitado, la primera experiencia es en el Aeropuerto de Orly (Paris-1948) y posteriormente en el Aeropuerto de Galeao (Río de Janeiro). El diseño trata de compensar su costo vs. Disminución del espesor, presenta problemas en su ejecución y mantenimiento.

### **Pavimentos de concreto hidráulico reforzado con fibras (PCH RF)**

Incorpora fibras metálicas, de propileno, carbón, etc. con excelentes resultados en Aeropuertos y sobre capas delgadas de refuerzo. El diseño es más estructural y de buen comportamiento mecánico, pero sus costos y los cuidados requeridos en su ejecución, dificultan su desarrollo.

### **2.5.- Principales característica de los pavimentos rígidos**

Además de cumplir con resistir los esfuerzos normales y tangenciales transmitidos por los neumáticos y su constitución estructural, bien construida (Gran resistencia a la Flexo-Tracción, a la Fatiga y elevado Modulo de Elasticidad), debe tener el espesor suficiente que permita introducir en los casos más desfavorables solo depresiones débiles a nivel del suelo del terreno de fundación y cada nivel estructural apto para resistir los esfuerzos a los que está sometido. Debe cumplir con satisfacer también las características principales del pavimento rígido las cuales son las siguientes:

- ✓ Estar previstas para un periodo de servicio largo.
- ✓ Prever un bajo mantenimiento.
- ✓ Mayor vida útil y mejores condiciones de servicio.
- ✓ Puede diseñarse para resistir ataque químico, aceites, interperismo, etc.
- ✓ Puede soportar mejor las sobrecargas de vehículos, pocas limitaciones de peso.
- ✓ Distribuye más eficientemente las cargas de las llantas requiriéndose así menores espesores de capas subyacentes y/o especificaciones menos rígidas de materiales.
- ✓ Soporta el calor y no se reblandecen ni se vuelven pegajosos.

- ✓ Mejor respuesta en áreas difíciles donde son comunes cargas pesadas, y en sitios donde hay semáforos.

## **2.6. Propiedades y funciones de los pavimentos rígidos**

La consideración de dos propiedades básicas del pavimento revela que un solo principio se aplica a cada aspecto del diseño de las sub-bases y subrasantes. El módulo de elasticidad del hormigón oscila entre 280 000 y 420 000 Kg /cm<sup>2</sup>. Esto significa que los pavimentos de hormigón tienen un alto grado de rigidez y la resistencia a flexión del hormigón varía de 38 a 52 Kg. /cm<sup>2</sup> a los 28 días, característica elemental de resistencia a viga.

A causa de estas propiedades, rigidez y resistencia a viga, el pavimento de hormigón distribuye las cargas que soporta sobre una gran zona de la subrasante, las deflexiones son pequeñas y las presiones unitarias transmitidas a la subrasante son muy reducidas. Se deduce en consecuencia que los pavimentos de hormigón no requieren subrasantes resistentes, sino de un valor soporte razonablemente uniforme.

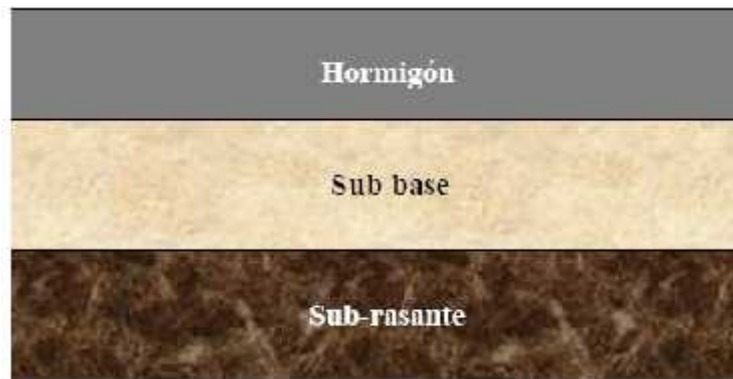
Además de las propiedades estructurales comentadas, el pavimento rígido debe satisfacer funciones que pueden resumirse de la siguiente forma:

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

## 2.7. Variables que intervienen en el diseño de pavimentos rígidos

El pavimento rígido tiene como elemento estructural fundamental una losa de hormigón, esta se apoya sobre una capa de material seleccionado, a la que se le da el nombre de subbase y posteriormente esta se apoya a un capa de suelo natural llamada subrasante; en ocasiones cuando la subrasante del pavimento tenga una calidad suficiente buena, se descarta el uso de la subbase de acuerdo a criterios constructivos.

**Figura 2.8.- Elementos que Constituyen el Pavimento Rígido**



### 2.7.1. Capa subrasante

Es el terreno de fundación del pavimento, constituye la capa superior de la terracería y por lo consiguiente la capa de apoyo de los pavimentos; la cual puede estar formada por el propio terreno natural, perfilado y compactado adecuadamente. Sin embargo, cuando el material local no tiene las características para cumplir tal función, por presentar problemas de expansión, bajo valor relativo de soporte, etc., se recurre a la utilización de materiales seleccionados de mejor calidad procedente de un banco de material. Por lo anteriormente dicho constituye el elemento de apoyo del pavimento, por lo que debe resistir adecuadamente los esfuerzos que le son transmitidos, aun en condiciones severas de humedad.

### **Características de la capa subrasante**

Los materiales que se utilicen como capa subrasante deberán ser, de preferencia, del tipo: GW, SW, SM, ML, siempre que la porción fina, o sea la arcilla, no sea de alta plasticidad. Este material deberá ser compactado del 95 al 100 % de la prueba de compactación AASHTO T-99 o estándar.

Cuando los materiales sean del tipo CL, MH, CH y cuando su límite líquido, LL, esté comprendido entre 50% y 100%, se analizará la posibilidad de mejorarlos, con la finalidad de reducir los valores del LL y, en consecuencia, del IP.

Cuando el terreno de apoyo sea del tipo MH, CH y OH con LL = 100%, serán desechados como material de apoyo. Para ello se recomienda una sustitución del material en espesores mínimos de 30 cm. En todos los casos en que se encuentren bolsas de material con alto contenido de materia orgánica se deberá proceder a su sustitución total con material limoso mezclado con arena y/o grava.

Cuando en el corte de suelos naturales afloren fragmentos de roca, éstos no serán admitidos como lecho de apoyo. De ser así, se deberá proceder a la remoción de estos fragmentos endurecidos.

### **Ensayos para determinar la resistencia del terreno**

En el diseño de pavimentos, es fundamental conocer las propiedades de los suelos que nos permiten entender sus características generales y sus comportamientos. Algunas de estas pruebas son las siguientes:

#### **Plasticidad**

- ✓ Límite líquido.
- ✓ Límite plástico.

### **Prueba Proctor**

Se refiere a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por el procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad. Su objetivo es determinar el peso volumétrico seco máximo que pueda alcanzar un material y la humedad óptima que deberá hacerse la compactación; determinar también el grado de compactación alcanzado por el material durante la construcción o cuando ya se encuentran construidos los caminos relacionando el peso volumétrico obtenido en el lugar con el peso volumétrico máximo Proctor.

Está limitada a los suelos que pasen totalmente la malla No. 4, o que, cuando mucho, tengan un retenido de 10% y que este retenido pase totalmente por la malla 3/8". Cuando el material tenga retenido en la malla 3/8", debe determinarse la humedad óptima y el peso volumétrico máximo con la prueba Porter estándar, así como también se trate de arenas de río, arenas producto de trituración, tezontles arenosos y en general en todos aquellos materiales que carezcan de cementación.

### **Prueba Porter**

Esta prueba determina el peso volumétrico seco máximo de compresión Porter y la humedad óptima en los suelos con material mayor de 3/8" y los cuales no se les pueden hacer la prueba Proctor.

### **Valor relativo de soporte**

Es un índice de resistencia al esfuerzo cortante en condiciones determinadas de compactación y humedad. Se expresa como el porcentaje de la carga necesaria para introducir un pistón de sección circular en una muestra de suelo respecto a la profundidad de penetración del pistón en una piedra tipo triturada. Por lo tanto, P2 es la carga en kg necesaria para hacer penetrar el pistón en el suelo en estudio y P<sub>x</sub>=1360 kg, la que se precisa para penetrar la misma cantidad en la muestra tipo de piedra triturada, el valor relativo de soporte del suelo es:

$$VRS = \frac{P2}{1360} * 100 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

### **Módulo de reacción (K)**

Es una característica de resistencia que se considera constante, lo que implica elasticidad del suelo. Su valor numérico depende de la textura, compacidad, humedad y otros factores que afectan la resistencia del suelo. La determinación de k se hace mediante una placa circular de 30" de diámetro bajo una presión tal que produzca una deformación del suelo de 0.127 cm. En general se puede decir que el módulo de reacción k es igual al coeficiente del esfuerzo aplicado por la placa entre la deformación correspondiente, producida por este esfuerzo.

### **2.7.2.- Capa subbase**

Se define como capa subbase para pavimentos rígidos la capa de material que se ubica antes de la losa de concreto. Se trata de un elemento importante para garantizar la uniformidad del soporte de las losas y se construye por lo general con materiales granulares, los cuales cuando el tránsito llega a ser muy pesado e intenso, se hace necesario estabilizar este material; para evitar que bajo su acción sufran erosiones indeseables se recurre a subbases de grava-cemento. Por otra parte cuando el tránsito es ligero el material de la capa subrasante es de buena calidad, se suprime la subbase. Debe mencionarse que eventualmente a esta capa se la denomina base, por su posición inmediata bajo la losa. Sin embargo se le designa como subbase debido a que en general los requerimientos de calidad de los materiales no son tan estrictos como los de una base en un pavimento flexible, teniendo en cuenta que la losa de concreto reduce los esfuerzos impuestos a esta capa por las cargas aplicadas por los vehículos.

### **Características de las subbases.**

La subbase es la capa de material seleccionado que se coloca encima de la subrasante.

La subbase tiene por objeto:

- ✓ Servir de capa de drenaje al pavimento.
- ✓ Controlar o eliminar en lo posible cambios de volumen, elasticidad y plasticidad perjudiciales que pudiera tener el material de la subrasante.

- ✓ Controlar la ascensión capilar del agua proveniente de las capas freáticas cercanas protegiendo así al pavimento contra los hinchamientos que se producen en épocas de helada. Este hinchamiento es causado por el congelamiento del agua capilar, fenómeno que se observa especialmente en los suelos limosos donde la ascensión capilar del agua es considerable.

El material de la sub-base debe ser seleccionada y tener mayor capacidad que el terreno de fundación compactado, este material puede ser grava, arena, grava o granzón, escoria de los altos hornos y residuos de material de cantera. En algunos casos es posible emplear para la sub-base material de la subrasante mezclado con granzón, cemento, etc.

El material debe tener las características de un suelo A1 o A2 aproximadamente. Su límite líquido debe ser inferior al 35% y su índice plástico no mayor a 6. El CBR no podrá bajar del 15%.

Si la función principal de la sub-base es de servir de capa de drenaje, el material a emplearse debe ser granular y la cantidad de material fino que pasa el tamiz No 200 no deberá ser mayor al 8%.

En la actualidad como elemento drenante en la sub-base se está utilizando con mucha frecuencia geotextiles. El geotextil se define como cualquier textil permeable usado en fundaciones, roca o suelo. Sus propiedades hidráulicas son considerables, convenientes para las funciones de filtración y drenaje.

### **Granulometría.**

A manera de guía, en la tabla 2.1, de la especificación AASHTO M 147, se muestran granulometrías críticas del material de subbase cuando se emplean subbases con materiales de tamaño uniforme, semejantes a la granulometría A, puede ser necesario tomar ciertas precauciones para evitar la intrusión de los suelos finos subyacentes hacia la subbase.

**Tabla 2.1.- Requisitos Granulométricos de Materiales para Subbases**

**Mezcla suelo – agregados AASTHO M147**

Tamaño de la Malla	Porcentaje que pasa en peso					
	A	B	C	D	E	F
2"	100	100	...	...	...	...
1"	...	75-95	100	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	...	...
Nº 4	25-65	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
Nº 200	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20	8-25

Fuente: AASTHO M147

Adicionalmente el material deberá cumplir con lo que se indica a continuación:

<b>Límite Líquido</b>	25 % máx.
<b>Índice de Plasticidad</b>	6 % máx.
<b>Desgaste de los Ángeles</b>	40 % máx.
<b>Contracción Lineal</b>	4 % máx.
<b>Equivalente de Arena</b>	25 % min.
<b>C.B.R.</b>	40

### **Espesor**

Ya que la finalidad principal de la capa de la subbase es evitar el efecto del bombeo de finos, no es necesario ni tampoco económico utilizar subbases gruesas. Los espesores de subbase de 10 a 15 cm se especifican generalmente en proyectos comunes de construcción, como una manera práctica de garantizar el espesor mínimo de 5 a 7.5 cm, necesario para evitar el bombeo.

### **2.7.3. Clima**

#### **Condiciones de clima frío**

Cuando se elabora concreto en épocas de invierno, se presentan numerosos problemas que hacen necesaria una planeación anticipada. Antes de la iniciación de los trabajos deben tenerse a la mano los materiales para la protección de la subrasante y las capas de base y para el curado del concreto.

#### **Condiciones de clima cálido.**

Durante la fabricación del concreto en condiciones de clima cálido, deben tomarse las precauciones necesarias para colocarlo a la mínima temperatura que sea práctica. Las temperaturas del concreto deben ser controladas para asegurar su adecuada colocación, compactación, acabado y curado y para evitar el agrietamiento debido a contracciones plásticas del propio concreto. Tolerancias en los espesores, los pavimentos y las bases de concreto deben construirse con los espesores marcados en los planos del proyecto. Generalmente será suficiente realizar una revisión cuidadosa de la elevación de la cimbra y de la profundidad hasta la subrasante o la sub-base, haciendo mediciones con el auxilio de cordeles. Si se considera necesario verificar el espesor del pavimento después de construido, se hará efectuando mediciones en corazones extraídos de él con broca. Los corazones se tomarán a los intervalos que fije el ingeniero y deberán tener un diámetro mínimo de 10 cm. La medición de ellos debe efectuarse de acuerdo con la norma ASTM C174.

### **2.7.4. Capa de rodadura (Losa de hormigón)**

Constituye la parte fundamental del pavimento rígido, debiendo estar capacitadas para resistir los esfuerzos producidos por el tránsito y los efectos de la intemperie, y proporcionar además una superficie de rodamiento segura, cómoda y de características permanentes bajo el efecto combinado del tránsito y de los factores ambientales durante su vida útil, de manera que solo deban ser necesarias algunas actuaciones locales y esporádicas de conservación, de poca importancia y costo.

Un pavimento rígido se halla constituido por un elemento estructural fundamental una losa de concreto; debido a la rigidez que presenta esta losa, esta clase de pavimentos no requieren, al menos desde un punto de vista teórico, apoyarse sobre una explanada o capa de elevada capacidad de soporte.

Normalmente el espesor de la losa puede partir de unos 15 cm para tránsito muy ligero, hasta llegar a ser del orden de 40 cm en el caso de autopistas y carreteras con alto nivel de tránsito pesado, requiriendo además concretos homogéneos y de alta calidad, con resistencias a la tensión no inferiores a 3.5 MPa, y muy comúnmente de 4 MPa o más.

El hormigón de tipo vibrado utilizado para trabajos de pavimentación debe satisfacer ciertas características muy particulares, que marcan diferencias con respecto a los hormigones utilizados en otro tipo de obras, por lo que puede clasificarse como un hormigón de alto comportamiento. A continuación se indican las características que son fundamentales para la correcta elaboración de la mezcla, que su finalidad es satisfacer los requerimientos indispensables para la elaboración de la losa de hormigón.

### **Calidad del Hormigón**

Las mezclas del Concreto Hidráulico para Pavimentos deben de estar previstas para:

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

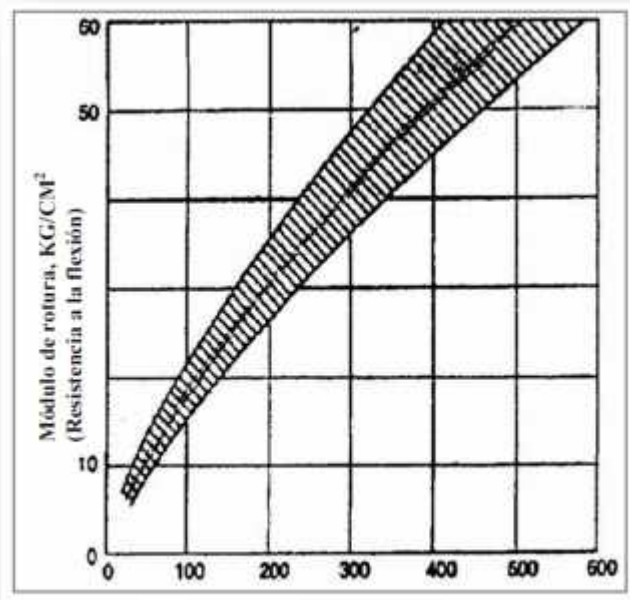
La flexión en los Pavimentos de Concreto Hidráulico, bajo las cargas aplicadas porros neumáticos, produce esfuerzos de compresión y tensión. Los esfuerzos de compresión son pequeños en relación a la resistencia de la misma, y sin mayor incidencia en el espesor de la losa.

Por lo tanto el concreto hidráulico que se utiliza en los pavimentos se especifica por su resistencia a la flexión, medida por el Módulo de Rotura a Flexión, a los 28 días. El Módulo de Rotura a Flexión (MR) expresada en  $\text{kg/cm}^2$ , generalmente varía entre los siguientes valores:

### 40 MR 50

A continuación se presenta un gráfico de la correlación entre el Módulo de Rotura a Flexión (MR) y la resistencia a la compresión del Concreto Hidráulico a los 28 días ( $f'c$ ).

**Figura 2.9.- Deformación de la losa durante el día, origen de la grieta por carga**



$$MI = \frac{PL}{bd^2} \left( \frac{kg}{cm^2} \right) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$0.10f'c \quad MR \quad 0.17f'c$$

Dónde:

P = Carga de Rotura.

L = Distancia entre apoyos.

B = ancho de la viga.

D = peralte de la viga.

En Pavimentos de Concreto Hidráulico se exige:

- ✓ MR 40 kg/cm<sup>2</sup> o sea  $f'c$  280 kg/cm<sup>2</sup>.
- ✓ Aceptándose  $f'c$  210 kg/cm<sup>2</sup> para tráfico ligero.

## **Propiedades y Control**

La calidad de un concreto se define en términos de trabajabilidad, resistencia y durabilidad. Estos aspectos de la calidad del concreto fueron optimizados en el proyecto, encontrar un método de diseño que garantice estas características con el resultado de un concreto económico es una tarea importante.

Los objetivos particulares que se busca son:

- ✓ Su trabajabilidad para su colocado fácilmente.
- ✓ Resistencia y durabilidad satisfactoria.
- ✓ El logro de mezcla competitiva a costos los más bajos posibles.

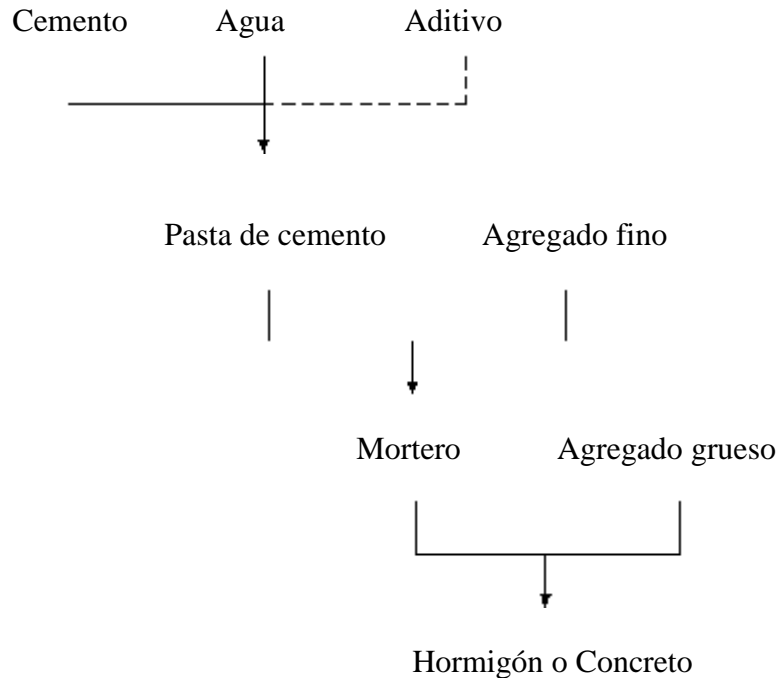
Dentro de las actividades de control que se debe poner atención en la ejecución de losa de hormigón, podemos mencionar las más importantes:

- ✓ Verificación previa de la calidad y consolidación de los materiales que componen las capas de transición o de apoyo.
- ✓ Evaluación y aceptación de los materiales que conformaran el hormigón, respaldados mediante certificados de calidad y abalados por ensayos físico-químicos de un laboratorio de materiales.
- ✓ Verificación y oportuna corrección al diseño y dosificación de la mezcla.
- ✓ Control del transporte, colocación, vibrado, terminado y curado de la losa de hormigón.

## **Características y propiedades del hormigón**

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

### Esquema de Integración del Hormigón



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

#### Características mecánicas del hormigón

##### a.- Resistencia a compresión y característica del hormigón

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

de resistencia característica, nos referimos a la primera definición, salvo advertencia en contrario.

Para consideraciones promedio el  $H^o$  que posee un módulo de rotura (método IRAM 1547-ASTM C 78) comprendido entre 40 y 50  $\text{kg/cm}^2$  a los 28 días resulta económicamente más conveniente.

### **b.- Resistencia a tracción del hormigón**

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

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

## **Materiales que constituyen la losa de hormigón**

### **a.- Cemento**

Los cementos son los conglomerantes hidráulicos, o sea materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molidos y convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen tanto en el aire como bajo el agua. Los cementantes que se utilizan para la fabricación del hormigón son hidráulicos, es decir, fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, aun estando inmersos en ella, característica que los distingue de los cementantes aéreos que solamente fraguan y endurecen en contacto con el aire.

Los cementos para hormigón hidráulico son elaborados a base de 29linker Portland en nuestro medio, por cuyo motivo se justifica centrar el interés en éste. Para la elaboración del 29linker Portland se emplean materias primas capaces de aportar principalmente cal y sílice, y accesoriamente óxido de fierro y alúmina, para lo cual se seleccionan materiales calizos y arcillosos de composición adecuada. Estos materiales se trituran, dosifican, muelen y mezclan íntimamente hasta su completa homogeneización, ya sea en seco o en húmedo.

La materia prima así procesada, ya sea en forma de polvo o de lodo, se introduce en hornos rotatorios donde se calcina a temperaturas del orden de 1400° C, hasta que alcanza un estado de fusión incipiente. En este estado se producen las reacciones químicas requeridas y el material se subdivide y aglutina en fragmentos no mayores a 6 cm. Cuya forma se regulariza por efecto de la rotación del horno. A este material fragmentado, resultante de la calcinación, se le denomina 30linker Portland.

Una vez frío, el 30linker en proporción en masa entre el 95 y 100%, se muele conjuntamente con una reducida proporción de yeso en masa entre 0 y 5%, que tiene la función de regular el tiempo de fraguado, y con ello se obtiene el polvo fino de color gris que se conoce como cemento Portland simple, el mismo que se constituye en el cemento que se ha utilizado tradicionalmente para la fabricación del concreto hidráulico en el país.

En la siguiente tabla 2.4 y tabla 2.5 obtenidos de la Norma Boliviana (IBNORCA) se muestra algunas características del cemento.

**Tabla 2.2.- Análisis Químico-Físico y Mecánico de los Cementos.**

Análisis Químico		Unidad	Requisitos Según NB 011
Oxido de Magnesio: (NB 061)	MgO	%	menor a 6,0
Óxido de Azufre: (NB 061)	SO <sub>3</sub>	%	menor a 4,0
Pérdidas Por Calcinación: (NB 061)	PPC	%	menor a 7,0
Ensayos Físicos		Unidad	
Tiempo inicial de fraguado: (NB 063)		h:min.	Mayor a 0:45
Tiempo final de fraguado: (NB 063)		h:min.	Menor a 10:00
Expansión (Le Chatelier C-A): (NB 643)		mm	menor a 10:00
Finura, Superficie Específica según Blaine: (NB 472)		cm <sup>2</sup> /g	mayor a 2600
Peso específico: (NB 064)		g/cm <sup>3</sup>	No especifica

**Tabla 2.3.- Ensayos Mecánicos – Resistencia del Cemento**

Ensayos Mecánicos		Unidad	
Norma NB 470 (ASTM C1099)			
Resistencia a la compresión	3 días	MPa	mayor a 17
En mortero normalizado a:	7 días	MPa	mayor a 25
	28 días	MPa	mayor a 40

**Tabla 2.4.- Tipos de Cemento y características**

TIPO	CARACTERÍSTICA	AJUSTE PRINCIPAL
I	Cemento normal u ordinario, destinado a obras de concreto en general.	Sin ajuste específico en este aspecto.
II	Destinado a obras de concreto en general y obras expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se requiere moderado calor de hidratación.	Moderado C3A
III	Cemento Portland de alta resistencia inicial.	Alto C3S
IV	Es el cemento del cual se requiere bajo calor de hidratación.	Alto C2S, moderado C3A
V	Es el cemento del cual se requiere alta resistencia a la acción de los sulfatos.	Bajo C3A

cemento Portland más usado en nuestro país, es el TIPO I (ASTM)

**Tabla 2.5.- Categorías Resistentes de los Cementos.**

Categorías resistentes		Resistencias a la compresión (MPa) (NB 470) (1)		
		Mínimas a 3 días	Mínimas a 7 días	Mínimas a 28 días
Alta	40 MPa	17	25	40
Media	30 MPa	-	17	30
Corriente	25 MPa	-	15	25

Fuente: Norma Boliviana

### b.- Requisitos del agua.

El agua es un elemento fundamental en la elaboración del concreto, estando relacionado con la resistencia, trabajabilidad y propiedades del concreto endurecido; por lo que debe tenerse muy en cuenta la calidad de la misma.

En todos los casos, deberá ser limpia y libre de aceites, ácidos, azúcar, materia orgánica y cualquier otra sustancia perjudicial al pavimento terminado. En general, se considera adecuada el agua que sea apta para el consumo humano. El pH medido según norma ASTM D-1293, no podrá ser inferior a cinco (5).

El agua deberá cumplir con los requisitos indicados en la tabla 2.6. Se excluye al agua de mar en este apartado.

**Tabla 2.6.- Valores Característicos y límites tolerables de sales e impurezas en el agua**

Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas en el agua		
Impurezas	Valores en partes por millón (ppm)	
	Tipo de cemento	
	Cementos ricos en calcio	Cementos resistente a los sulfatos (RS)
Sólidos en suspensión en aguas naturales (limos y arcillas), máximo	2 000	2 000
Sólidos en suspensión en aguas recicladas <sup>[1]</sup> : (finos de cemento y de agregados), máximo	50 000	35 000
Cloruros como Cl <sup>[2]</sup> :		
• Para concreto con acero de presfuerzo y piezas de puentes <sup>[3]</sup> , máximo	400	600
• Para concretos reforzados que estén en ambiente húmedo o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares <sup>[3]</sup> , máximo	700	1 000
Sulfato como SO <sub>4</sub> <sup>[2]</sup> , máximo	3 000	3 500
Magnesio como Mg <sup>++</sup> <sup>[2]</sup> , máximo	100	150
Carbonatos como CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> , máximo	600	600
Bióxido de carbono disuelto como CO <sub>2</sub> , máx	5	3
Alcalis totales como Na <sup>+</sup> , máximo	300	450
Total de impurezas en solución, máximo	3 500	4 000
Grasas o aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido) <sup>[4]</sup> , máximo	150	150
Potencial de hidrógeno (pH), mínimo	6	6,5

**c.- Aditivos.**

Los aditivos son sustancias que se pueden agregar al concreto con el fin de modificar algunas de sus propiedades, o para inducirle algunas características adicionales: trabajabilidad, reducción de agua de mezclado, incorporación de aire, modificación de los tiempos de fraguado, proporcionar diferentes grados de impermeabilidad. No obstante que en prácticamente en todos los concretos es posible utilizar aditivos, existen tres criterios básicos que deberán tomarse en cuenta:

- ✓ La adición de aditivo a la mezcla deberá lograr el objetivo buscado sin alterar su proporcionamiento básico.
- ✓ Su empleo estará justificado desde el punto de vista económico.
- ✓ Se investigará que el producto no tenga efectos nocivos en la mezcla, tanto de forma inmediata como a largo plazo

En pavimentos rígidos se emplean más frecuentemente dos tipos de aditivos: los inclusores de aire y los reductores de agua. Sin embargo, algunas aplicaciones especiales demandan características específicas del concreto hidráulico, por lo que en ocasiones se pueden emplear superfluidificantes, retardantes e incluso acelerantes de fraguado y para climas bastantes fríos se suele emplear inclusores de aire.

El almacenamiento de aditivo requiere del cuidado de varios aspectos:

- ✓ No se debe dejar contaminar ni sufrir daño.
- ✓ Los depósitos de aditivo nunca se deben exponer a frío ni calor excesivo y los aditivos nunca deben congelarse.
- ✓ Es importante realizar ensayos de control de calidad a estos productos químicos para asegurar una correcta aplicabilidad.

**d.- Agregados.**

Empleados para la confección de hormigones, pueden emplearse arenas y gravas naturales o procedentes de machaqueo, que reúnan en igual o superior grado las características de resistencia y durabilidad que se le exijan al hormigón.

### **Agregado Grueso.**

Los agregados tanto gruesos como finos constituyen en conjunto cerca del 75% del volumen de la mezcla de concreto, por lo que su calidad influye grandemente en sus características, principalmente de trabajabilidad, resistencia, durabilidad y economía.

El agregado grueso corresponde a la fracción cuyas partículas son mayores a 4.76 mm (malla N°4), se tiene un tamaño máximo hasta de 63.5 mm (2 ½") en concretos vibrados. Es importante, para prevenir la segregación de tamaños en su manipulación, previamente a la elaboración del concreto, fraccionar el agregado grueso en dos porciones como mínimo, separadas por la malla de 19 mm (¾") cuando el tamaño máximo es de 38,1 mm (1 ½") o por la malla de 25.4 mm (1") cuando el tamaño máximo sea de 50.8 mm (2") o de 63.5 mm (2 ½").

Los agregados deben tener como principales características el ser duros, sanos, resistentes al interperismo e inertes a la reacción química con los álcalis del cemento. Los agregados con partículas blandas, disgregables o laminares son inconvenientes y deben por lo tanto evitarse en la construcción de pavimentos.

Con objeto de obtener concretos de alta calidad, facilitar su construcción, evitar riesgos de segregación y lograr un mejor acabado superficial, el tamaño máximo recomendado generalmente para el concreto es de 5 cm.; no debe ser mayor que la cuarta parte del espesor de la capa en que se pretende utilizar. Debe también mencionarse que, a mayor tamaño máximo, se requiere menor cantidad de pasta de cemento y, por lo tanto, menor consumo de cemento para alcanzar la resistencia requerida, debiendo vigilarse que la granulometría de los agregados sea la adecuada.

La forma de la partícula es importante tanto en los agregados finos como en los gruesos. Cuando existan partículas planas y alargadas o de forma angulosa, se requerirá mayor porcentaje de material fino y mayor contenido de agua y cemento para producir un concreto trabajable, que cuando el agregado es redondeado, como suele ser el caso de los agregados naturales.

El agregado producto de trituración de roca o de fragmentos puede reunir características muy satisfactorias cuando la forma de sus partículas no se aparta apreciablemente de la forma cúbica; a este respecto debe mencionarse la influencia que ejerce la naturaleza del material y el tipo de trituradora en la forma resultante de las partículas.

La granulometría del agregado grueso para un tamaño máximo dado puede variar considerablemente sin afectar apreciablemente el contenido de cemento, siempre y cuando el contenido de arena se mantenga próximo al óptimo para lograr una buena trabajabilidad; sin embargo, la curva granulométrica deberá quedar en todo momento dentro de los límites especificados, salvo que se cuente con experiencia local de buen comportamiento de mezclas efectuadas con curvas granulométricas fuera de dichos límites.

**Tabla 2.7.- Características Físico –Químicas de los Agregados Gruesos**

Desgaste a los Ángeles	30 %
Tamaño máximo	50 mm.
Peso Unitario valores entre	1,20 y 1,50 gr./cm <sup>3</sup>
Absorción de agua 24 horas ( la perdida)	no excederá del 3% en peso
<b>No contendrá sustancias perjudiciales en exceso de los siguientes limites</b>	
Fragmentos Blandos	3 % en peso
Carbón y lignito	1 % en peso
Terrones de arcilla	0,5 % en peso
Material que pasa el tamiz N° 200	1 % en peso
Durabilidad con sulfato de sodio ( la perdida)	luego de 5 ciclos no excederá el 12%

Fuente: Anual Book of ASTM, Road and paving Materials, Vehi-Pavement System

La distribución por tamaño de las partículas se determina por separación con una serie de mallas normalizadas. En las tablas que a continuación presentamos, se muestran las mallas utilizadas en el cribado del agregado grueso.

**Tabla 2.8.- Granulometría del Agregado Grueso.**

Tamiz Malla cuadrada ASTM	Porcentaje en Peso que pasa Según el tamaño máximo		
	2.5 cm. ( 1" )	4 cm. ( 1 1/2" )	5 cm. ( 2" )
2 1/2"	...	...	100
2"	...	100	90-100
1 1/2"	100	90-100	...
1"	90-100	...	35-70
3/4"	...	35-70	...
1/2"	25-60	...	10-30
3/8"	...	10-30	...
Nº 4	0-10	0-5	0-5
Nº 8	0-5	...	...

Fuente: Anual Book of ASTM, Road and paving Materials, Vehi-Pavement System

### **Agregado Fino.**

Es el agregado de mayor responsabilidad; a diferencia de la grava, el agua e incluso el cemento, puede decirse que no es posible hacer un buen hormigón sin una buena arena.

Las mejores arenas son las de río, ya que, salvo raras excepciones, son cuarzo puro, por lo que no hay que preocuparse acerca de su resistencia y durabilidad.

La arena de mina suele tener arcilla en exceso, por lo que generalmente es preciso lavarla. Las arenas de mar, si son limpias, pueden emplearse en hormigón, previo lavado con agua dulce.

Las arenas que provienen del machaqueo de granitos, basaltos y rocas análogas son también excelentes, con tal de que se trate de rocas sanas que no acusen un principio de descomposición.

Deben rechazarse de forma absoluta las arenas de naturaleza granítica alterada (caolinización de los feldespatos).

Las arenas de procedencia caliza son de calidad muy variable. Siempre resultan más absorbentes y requieren más cantidad de agua de amasado que las silíceas.

Su resistencia al desgaste es baja, por lo que los hormigones sometidos a este efecto (por ejemplo, en pavimentos) deben confeccionarse con arena silícea, al menos en un 30 % de la totalidad de la arena.

La humedad de la arena tiene gran importancia en la dosificación de los hormigones, sobre todo cuando se dosifica en volumen. Por ello es siempre necesario tenerla en cuenta.

Respecto a los agregados finos, para el caso de pavimentos, se puede exigir las siguientes características:

**Tabla 2.9.- Características Físico –Químicas de los Agregados Finos.**

Módulo de finura	> 2,3 y < 3,10
Peso Unitario valores entre	1,20 y 1,50 gr./cm <sup>3</sup>
Absorción de agua 24 horas ( la perdida)	no excederá del 5% en peso
<b>No contendrá sustancias perjudiciales en exceso de los siguientes limites</b>	
Carbón y lignito	0,5 % en peso
Terrones de arcilla	3,0 % en peso
Material que pasa el tamiz N° 200, vía húmeda	3,0 % en peso
Otra sustancias como álcalis, sales, mica, partículas blandas, etc.	1 % en peso

Fuente: Anual Book of ASTM, Road and paving Materials, Vehi-Pavement System

La distribución por tamaño de las partículas se determina por separación con una serie de mallas normalizadas. En la tabla que a continuación presentamos, se muestran las mallas utilizadas en el cribado del agregado fino.

**Tabla 2.10.- Serie de Mallas Estándar y Límites de Tolerancia Para la Arena**

Tamiz Malla cuadrada ASTM	Porcentaje en Peso que pasa Según el tamaño máximo
3/8"	100
N° 4	95 – 100
N° 8	85 – 100
N° 16	45 – 80
N° 30	23 – 60
N° 50	10 – 30
N° 100	2 – 10

Fuente: Anual Book of ASTM, Road and paving Materials, Vehi-Pavement System

### 2.7.5.- Análisis de tráfico

El análisis de tráfico y la clasificación de vía se obtendrán a partir del número de vehículos que, probablemente, pasarán diariamente por el sistema vial proyectado.

La **PCA** y la **AASHTO**, como avanzada tecnológica, sólo consideran los vehículos pesados, tales como camiones, autobuses, etc. en el cálculo de la estructura, con carga superior a 5 toneladas.

Este tipo de vehículos, generalmente, corresponden a 6 o más ruedas; los de peso inferior o vehículos ligeros, camionetas o tractores sin carga, provocan un efecto mínimo sobre el pavimento y no son considerados en los cálculos estructurales del Pavimento Rígido.

**Figura 2.10.- Nomenclatura de Tipos de Vehículos**

		Tipo de Vehículo PCA-AASHTO
VEHÍCULOS DE MENOS DE SEIS RUEDAS (NO se tienen en cuenta en el cálculo)	MOTOS	
	AUTOMÓVILES	
	FURGONETAS	
	TRACTORES SIN REMOLQUE	
	TRACTORES CON REMOLQUE	
VEHÍCULO DE SEIS O MÁS RUEDAS (Se tienen en cuenta en el cálculo)	AUTOCARES y AUTOBUSES	T3-S2 T3-S2-R2 T3-S2-R3 T3-S2-R4
	CAMIONES	

## CAPÍTULO III

### MÉTODOS DE DIMENSIONAMIENTO DE PAVIMENTO RIGIDO

#### 3.1.- Principios Generales en el Dimensionamiento

Dentro de los principios que deben tomarse en cuenta para el diseño de estructuras de pavimento es necesario analizar fundamentalmente la problemática que representa el comportamiento de los pavimentos debido al tráfico, ya que se incrementa conforme al desarrollo tecnológico y crecimiento demográfico, lo que trae a su vez mayor cantidad de repetición de ejes y cargas.

Por ello es necesaria la selección de apropiados factores para el diseño estructural de los diferentes pavimentos, por lo que se deberá tomarse en cuenta la clasificación de la carretera dentro de la red vial, la selección de los diferentes tipos de materiales a utilizarse, el tráfico y los procesos de construcción

##### a.- Clasificación de calles y carreteras

La clasificación es el proceso por medio del cual las calles y carreteras son organizadas dentro de un sistema funcional, de acuerdo con el carácter de servicio que prestan y que ayude a seleccionar los factores apropiados de tráfico y otras variables que sean necesarias.

##### b.- Selección de variables de diseño

Las propiedades de la subrasante, características de los materiales, importancia del tráfico, factores de medio ambiente y otro tipo de variables, son las que intervienen en el diseño de estructuras de pavimento. Muchas veces, para caminos y calles de menor importancia, la información no está disponible o actualizada, por lo que es necesario recabarla.

Algunos valores de diseño están especificados y pueden variar con el tipo de carretera o nivel de tráfico. Para tráfico pesado se han seleccionado valores más conservadores con resultado de espesores mayores.

Poco conocimiento de las características de la subrasante y las propiedades de otros materiales particularmente de la pavimentación, variaran su calidad y desempeño, lo que traerá como consecuencia un alto costo de mantenimiento.

#### **c.- Criterios de diseño**

En los procedimientos de diseño, la estructura de un pavimento es considerada como un sistema de capas múltiples y los materiales de cada una de las capas se caracterizan por su propio Modulo de Elasticidad.

La evaluación de tráfico está dada por las repeticiones de una carga en un eje simple equivalente de 80 KN (18000 lbs) aplicada al pavimento en un conjunto de dos juegos de llantas dobles. Para propósitos de análisis estas dobles llantas equivalen a dos platos circulares con un radio de 115 mmm espaciados 345mm centro a centro, correspondiéndole 80 KN de carga al eje y 483 kPa o 70 PSI de presión de contacto sobre la superficie.

#### **d.- Caracterización de materiales**

Todos los materiales están caracterizados por el Modulo de Elasticidad, llamado Modulo Dinámico, el cual está en función directa del tiempo de fraguado, Módulo de Resiliencia para los materiales granulares sin tratar y los materiales de los suelos, coeficientes de Poisson y demás características propias de los materiales.

#### **e.- Efectos de temperatura en la estructura del pavimento**

El módulo de resiliencia de la subrasante y los materiales granulares de la subbase resulta afectada con respecto a los cambios de temperatura.

#### **f.- Costos del ciclo de vida**

En los procedimientos de diseño es necesario realizar un estudio de costo de ciclo de vida de las alternativas de pavimentos diseñados, que le permitan al diseñador tomar una decisión sobre los tipos de pavimentos más convenientes a construir, tomando también en cuenta las políticas de mantenimiento

## **3.2.- Tipos de dimensionamiento**

### **3.2.1.- Métodos Empíricos**

El método empírico es un modelo de investigación científica, que se basa en la experimentación y la lógica empírica, que junto a la observación de fenómenos y su análisis estadístico, es el más utilizado en el dimensionamiento de pavimentos en nuestra región. Entre sus características principales tenemos:

- Basado en resultados de experimentos de campo.
- Vincula variables de diseño e indicadores de comportamiento ( ejm: Método CBR)
- Las relaciones observadas no están necesariamente asociadas a una base científica.

Algunos métodos empíricos son:

- AASHTO 1993

### **3.2.2.- Métodos Mecanicistas**

El método mecanicista o racional es el utilizado por el conocimiento y razón sobre fenómenos que no son susceptibles de comprobación experimental, basado en la observación y en la aceptación de ciertas existencias contrariamente a las metodologías empíricas.

Las metodologías mecanicistas pretenden tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Sus características más importantes son:

- Basado en la mecánica del comportamiento estructural ante la aplicación de cargas
- Deben conocerse las propiedades fundamentales de los materiales y la geometría de la estructura sometida a sollicitaciones

Algunos métodos mecanicistas son:

- VIZIR
- PCA
- Kenpav y Westergaard

### **3.2.3.- Métodos Empírico-Mecanicistas**

Los métodos empírico-mecanicistas o semiempíricos es la combinación entre las metodologías empíricas y mecanicistas, entre la experiencia con el conocimiento en modelos matemáticos. Sus características mas importantes son:

- Combina aspectos tanto empíricos como mecanicistas.
- Los componentes mecanicistas permiten determinar la respuesta del pavimento ante situaciones “críticas” de cargas y clima, utilizando modelos matemáticos.
- Los componentes empíricos relacionan respuesta del pavimento con indicadores observados de comportamiento (deterioros e IRI).
- Límites aceptables y confiabilidad son definidos individualmente para cada indicador.

Algunos métodos semiempíricos:

- AASHTO 2002
- AASHTO 2008 (mejora del 2002)

### **3.3.- Métodos Empíricos**

#### **3.3.1.- Método de Diseño: AASHTO 1993**

##### **3.3.1.1.- Reseña Histórica**

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

En la prueba AASHO Road Test se realizaron 6 circuitos de prueba de dos carriles cada uno, los cuales contaban con la mitad del tramo construido con pavimento rígido y la otra con pavimento flexible, se experimentaron 836 secciones con cerca de 200 combinaciones diferentes de superficies, bases y sub-bases.

Se hicieron pruebas de tráfico que consistían en la circulación de vehículos con diferentes configuraciones de ejes simples y tándem, los cuales eran conducidos por las pistas de pruebas. Se recopiló la información relacionada con la condición del pavimento con respecto a la presencia de grietas y la cantidad de recarpeteos necesarios para mantener la sección de pavimento en servicio.

Toda esta información fue minuciosamente analizada, y los resultados formaron la base para la publicación de la guía interina para el diseño de estructuras de pavimento de la AASHO de 1961.

La primer guía de diseño de pavimentos de la AASHO fue editada en 1961 y 1962, la cual a su vez fue evaluada y revisada por el Comité de Diseño AASHTO en 1972, publicando la “AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures” la cual incorporó experiencias que fueron acumuladas desde la primera edición de la Guía de 1962, y en 1981 se revisó parte de la guía correspondiente al diseño de pavimentos rígidos.

Entre 1984 y 1985, el Subcomité en Prácticas de Diseño de Pavimentos y consultores revisaron la guía en vigencia, dando como resultado la “AASHTO Guide for the Design of Pavements Structures” (1986).

En 1993 se publicó una nueva versión de la guía AASHTO, la cual incorpora la revisión del diseño de sobrecapas, diseño de subbases delgadas, erosión de la subbase y confinamiento lateral, así como también se extendieron las extrapolaciones de las cargas de tráfico de ejes simples hasta 50,000 lb y en ejes tándem y tridem hasta 90,000 lb, también a la ecuación general de diseño de la guía se le agregaron algunos factores tales como: el error estándar combinado, la diferencia de serviciabilidad y el coeficiente de drenaje.

### 3.3.1.2.- Factores de Diseño

Las variables que intervienen para el diseño de pavimentos rígidos son tomadas en base a un conocimiento empírico, por lo que es importante conocer y entender las consideraciones que tienen que ver con cada una de ellas. La fórmula que propone la guía AASHTO 93 para el diseño del espesor de la losa de pavimento rígido se muestra en la siguiente ecuación:

$$\log W_{18} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Error Estándar Combinado} \\ Z_R S_o + 7.35 \log(D+1) - 0.06 + \frac{\log \Delta PSI}{1 + \frac{1.625 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} \\ \text{Desviación Estándar Normal} \end{array} \right. + (4.22 - 0.32 \rho_t) \log \left( \frac{\text{Módulo de Ruptura} \cdot \text{Coeficiente de Drenaje} \cdot (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J (D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c / k)^{0.25}})} \right)$$

(Ec. 3.1)

Las variables que intervienen en la ecuación 3.1 se detallan a continuación:

- a) Espesor de losa de pavimento de concreto hidráulico. (D)
- b) Número de ejes equivalentes del eje patrón de 18,000 libras (ESAL's), representado por el tráfico (W18).
- c) Coeficiente de confiabilidad (R), representado por la desviación normal estándar (ZR) y por el error estándar combinado (S0).
- d) Módulo de reacción de la subrasante-subbase (K).
- e) Pérdida de serviciabilidad ( PSI = P0 - Pt).

f) Propiedades del concreto: Módulo de ruptura (MR) y Módulo de elasticidad (E).

g) Coeficiente de transferencia de carga (J).

h) Coeficiente de drenaje (Cd).

La guía AASHTO 93 propone la solución de la ecuación 3.1 por medio de un nomograma, con el cual se obtiene directamente el espesor de la capa de rodadura de la estructura de pavimento rígido.

A continuación se describen de manera general las variables involucradas en el diseño de espesores de losa de pavimentos rígidos:

#### **a.- Espesor (D)**

Es la variable que se pretende determinar al realizar un diseño de una estructura de pavimento, el espesor se refiere solamente a la capa de concreto hidráulico que se coloca sobre la subbase y/o subrasante.

#### **b.- Tráfico**

Los resultados de la AASHO Road Test mostraron que el efecto dañino del paso de un eje de cualquier peso puede ser representado por un número de repeticiones de carga, equivalentes a 8.2 toneladas ó 18 Kips (ESAL's), aplicadas en el carril de diseño durante el periodo de diseño del pavimento. Esta simplificación se realizó debido a que en la época en que se desarrolló la AASHO Road Test, a principios de 1960, era mucho más sencillo utilizar un solo número para representar toda la carga por tráfico en las ecuaciones usadas para predecir la vida del pavimento.

El tráfico se debe de convertir a ESAL's por medio de la multiplicación de varios factores, tal como lo define la guía AASHTO, lo cual se presenta en la ecuación 3.2.

$$\text{ESAL's} = \Sigma (\text{No de vehículos por categoría} * F \text{ sentido} * F \text{ carril} * F \text{ crecimiento} * F \text{ eje equivalente})$$

**(Ec. 3.2)**

Los factores involucrados en la ecuación 3.2 se obtienen por medio de recomendaciones, ecuaciones o en las siguientes tablas. El factor de eje equivalente convierte los pesos según cada eje de los vehículos a pesos normalizados de 18 kips,

considerando el daño que puede causar cada eje en relación al daño que causa el paso de un eje estándar.

### **b.1.- Factor de sentido**

Relaciona el tráfico promedio diario anual (TPDA) y el sentido de circulación de la vía. La AASHTO en su guía recomienda un valor de 0.5 o lo que es lo mismo la mitad del tráfico en cada sentido y expresa que algunas experiencias han mostrado que este factor puede variar de 0.3 a 0.7 dependiendo en qué dirección los vehículos van cargados y en cuál van no cargados

### **b.2.- Factor de carril**

Es la distribución del tráfico en una sola dirección dependiendo del número de carriles con que cuenta cada sentido. Ver tabla 3.1

**TABLA 3.1.- FACTOR DE CARRIL**

<b>Factor de Carril</b>	
<b>Nº de Carril por sentido</b>	<b>Porcentaje de ESAL's en Carril de Diseño</b>
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4	50 - 75

Fuente: Guía de Diseño AASHTO 93

### **b.3.- Factor de crecimiento**

Con este factor se obtiene el tráfico esperado en el periodo de diseño de la estructura, está dada por la siguiente fórmula:

$$FC = \frac{(1+r)^n - 1}{r} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Dónde:  $r$  = Tasa de crecimiento.

$n$  = periodo de diseño en años.

➤ **Tasa de crecimiento**

La tasa de crecimiento del flujo vehicular depende en gran medida de factores económicos, sociales, capacidad de la vía y tipos de vehículos que circularán.

Este parámetro toma en cuenta el crecimiento de tráfico en un año de un determinado lugar, pero este se puede ver disminuido una vez el crecimiento ha llegado a niveles de saturación de la vía en cierto tiempo.

➤ **Periodo de diseño**

Este parámetro hace referencia al periodo de tiempo definido para que el pavimento sea útil desempeñándose satisfactoriamente en función de la proyección de tránsito en años, este factor influye mucho en lo económico. Se recomienda tomar en cuenta consideraciones para extender el periodo de análisis incluyendo una rehabilitación. La AASHTO proporciona algunos valores con respecto a la importancia de la vía, ver **tabla 3.2.**

El periodo de diseño no debe ser confundido con la vida del pavimento, ya que ésta última puede ser extendida por rehabilitaciones periódicas de la superficie o de la estructura del pavimento.

**TABLA 3.2.- Periodo de Análisis**

<b>Periodo de Análisis</b>	
<b>Condiciones</b>	<b>Periodo de análisis en años</b>
Alto volumen urbano	30 - 50
Alto volumen rural	20 - 50
Pavimentada de bajo volumen	15 - 25
Superficie no pavimentada bajo volumen	10 - 20

Fuente: Guía de Diseño AASHTO 93

Para el factor de eje equivalente, la guía AASHTO 93 proporciona en el apéndice D las tablas que convierten el tráfico a cargas de ejes simples equivalentes, en función del peso de cada eje, según el vehículo, el índice de serviciabilidad final y el espesor estimado del pavimento.

### c.- Coeficiente de confiabilidad (R)

Es la probabilidad que la serviciabilidad o desempeño de la vía se mantenga en niveles adecuados para las cargas del tráfico y condiciones ambientales, así como también se mantenga en niveles adecuados desde el punto de vista del usuario durante todo el periodo de diseño. Lo anterior no obstante a que los pavimentos pueden sufrir daños en su estructura debido a las cargas impuestas del tráfico y condiciones ambientales, por lo que deben llevarse a cabo intervenciones que permitan que la vía se comporte en un nivel de operación óptimo. El cuadro de valores de la confiabilidad según el tipo de vía se presenta en la tabla 3.3.

**TABLA 3.3.- Nivel de Confiabilidad**

<b>Confiabilidad</b>		
<b>Clasificación Funcional</b>	<b>Nivel de Confiabilidad</b>	
	<b>Urbana</b>	<b>Rural</b>
Autopista	85 - 99,9	80 - 99,9
Arteria primaria	80 - 99	75 - 95
Secundaria o Colectora	80 - 95	75 - 95
Local o vecinal	50 - 80	50 - 80

Fuente: Guía de Diseño AASHTO 93

La confiabilidad depende de diversas circunstancias que intervienen en su selección, como lo es la incertidumbre del volumen del tráfico en los incrementos que pudiesen surgir en el periodo para el cual se diseñe una vía. La confiabilidad es la variable en la cual se introduce un grado de certidumbre en el diseño y un nivel de seguridad o factor de seguridad (FR) para que el pavimento resista las cargas del tráfico en el periodo de diseño. El factor de seguridad (FR) depende del nivel de confiabilidad (R) y del error estándar combinado (So); tal como se puede observar en la ecuación 3.4.

La **desviación normal estándar** representa el rango de variación en la predicción del tráfico en el periodo de diseño y depende del nivel de confiabilidad requerido.

Considera la variabilidad estadística presente en las ecuaciones de diseño a causa de la variabilidad en los datos de diseño, incluyendo las propiedades de los materiales; del

suelo de fundación, estimaciones de tráfico, condiciones climáticas y calidad de construcción. Lo ideal sería que, estos valores se determinen en base a mediciones reales en condiciones locales. El Apéndice EE de la Guía AASHTO proporciona una guía para desarrollar este valor, lo cual no es una tarea fácil. Sin embargo, en ausencia de mediciones, la Guía provee recomendaciones en función de las consideraciones del tráfico futuro de diseño.

En caso de que el diseñador conozca de manera muy precisa las cargas y volumen de tráfico, puede utilizar valores menores, pero si no existe esta confianza y no se han utilizado balanzas para la determinación de cargas por eje ni estimaciones precisas debe utilizarse valores mayores. La Guía de Diseño AASHTO, en el caso de pavimentos rígidos presenta un rango entre 0.30 a 0.40, sin embargo, recomienda un valor de 0.34 para casos muy confiables y de 0.39 cuando no se tiene estudios muy profundos de tráfico y pesos por eje.

#### **d.- Módulo de reacción de la subrasante–subbase (k)**

Puesto que las cargas son transmitidas al suelo de subrasante, las características de soporte del mismo son fundamentales para un adecuado diseño de pavimento rígido.

El módulo de reacción de la subrasante (k), es una constante elástica que define la rigidez del material o resistencia a la deformación. Es la relación entre carga por unidad de área de superficie horizontal del suelo con el asentamiento correspondiente de la superficie; este parámetro representa la capacidad portante que posee un suelo en estado natural o con la combinación de una subbase, siendo éste el que servirá para colocar la estructura de pavimento.

La determinación del módulo de reacción del terreno se realiza a través del ensayo de placa (AASHTO T 235 ó ASTM D 1194). El ensayo de placa modela la subrasante como un conjunto de resortes en los que el valor “k” es análogo a la constante del resorte.

En carreteras y avenidas importantes que soportan tráfico pesado, es siempre recomendable la colocación de una capa base que permita uniformar el apoyo de la

losa, creando además una plataforma resistente para la construcción. Además, debe ser menos erosionable que el suelo de fundación y contar con una granulometría que permita reducir el bombeo de finos. (La mayoría de las recomendaciones indican porcentajes que pasen el tamiz 200 menores al 15% y CBR mayores a 40 ó 50%).

La determinación directa del valor de “k” mediante ensayos de placa es difícil y costosa, teniendo la desventaja de que normalmente se analiza el suelo en estado seco y sin considerar los efectos de la humedad. Debido a la poca sensibilidad del diseño de pavimentos rígidos al valor del coeficiente de soporte “k”, es permitido el uso de correlaciones derivadas de otras propiedades del suelo natural de fundación. Algunas de ellas son:

$$k \text{ (kPa / m)} = \frac{Mr \text{ (kPa)}}{0.493}$$

$$k \text{ (psi / in)} = \frac{Mr \text{ (psi)}}{19.4}$$

**Ec. (3.13)**

Dónde: k= Módulo de Reacción de la Subrasante

Mr= Módulo Resiliente

Por su parte, también es posible correlacionar el valor del Módulo Resiliente con el ensayo de CBR que es más conocido y fácil de ejecutar. AASHTO- 97 contiene la siguiente tabla de valores:

Tabla 3.4.- Características de tipos de suelos y relaciones

Tipo de suelo AASHTO	Descripción	SUCS	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	CBR %	Valor K (MPa/m)	Módulo resiliente (MPa)
<b>Suelos de grano grueso</b>						
A-1-a , bien graduado	Grava	GW, GP	19.6-22	60 - 80	81.44-122.16	70.37-140.74
A-1-a , mal graduado			18.9-20.4	35 - 60	81.44-108.58	70.37-140.74
A-1-b	Arena gruesa	SW	17.3-20.4	20 - 40	54.29-108.58	42.23-105.55
A-3	Arena fina	SP	16.5-18.9	15 - 25	40.72-81.44	35.18-14.07
<b>Suelos A-2 (materiales granulares con alto porcentaje de finos)</b>						
A-2-4 , gravosa	Grava limosa	GM	20.422.8	40 - 80	81.44-135.73	70.37-211.11
A-2-5 , gravosa	Grava areno limosa					
A-2-4 , arenosa	Arena limosa	SM	18.9-21.2	20 - 40	81.44-108.58	70.37-140.74
A-2-5 , arenosa	Arena limosa con grava					
A-2-6 gravosa	Grava arcillosa	GC	18.9-22.0	20 - 40	54.29-122.16	56.29-140.74
A-2-7 gravosa	Grava arcillosa con arena	SC	16.5-20.4	10 - 20	40.72-95.00	35.18-105.55
A-2-6 arenosa	Arena arcillosa					
A-2-7 arenosa	Arena arcillosa con grava					
<b>Suelos de grano fino *</b>						
A-4	Limo	ML , OL	14.1-16.5	4 - 8	6.79-44.79	14.07-42.22
	Grava-arena-limo		15.7-19.6	5 - 15	10.86-59.72	28.14-56.29
A-5	Limo alta compresibilidad	MH	12.6-15.7	4-8	6.79-51.58	14.07-42.22
A-6	Arcilla plástica	CL	15.7-19.6	5-15	6.79-89.22	14.07-70.37
A-7-5	Arcilla baja compresibilidad	CL, OL	14.1-19.6	4-15	6.79-58.36	14.07-70.37
A-7-6	Arcilla alta compresibilidad	CH, OH	12.6-17.3	3-5	10.86-59.73	28.14-70.37

Fuente: Guía de Diseño Versión 1997; Tabla 11; Pág. 6

(\*) El valor de suelos finos depende altamente de su grado de saturación

#### e.- Pérdida de serviciabilidad ( $PSI = P_0 - P_t$ )

La serviciabilidad se define como la capacidad del pavimento de desempeñarse adecuadamente ante todo tipo de tráfico que circula en la vía, se mide en una escala del 0 al 5, en donde 0 (cero) significa pavimento intransitable y 5 significa pavimento en excelentes condiciones. Este factor es una medida subjetiva de la calificación del pavimento; sin embargo, la tendencia es definirla usando parámetros como el índice de regularidad internacional (IRI).

La serviciabilidad inicial ( $P_0$ ) es la condición de un pavimento inmediatamente después de la construcción de éste. La guía AASHTO recomienda para pavimentos rígidos un  $P_0 = 4.5$ , mediante el uso de adecuadas técnicas de construcción. La serviciabilidad final ( $P_t$ ) es la capacidad funcional que se espera tenga un pavimento al final del periodo de diseño. La AASHTO sugiere que para carreteras principales se utilice un valor de  $P_t = 2.5$  ó  $3.0$  y para carreteras de bajo nivel un valor de serviciabilidad final de  $2.0$ .

**TABLA 3.5.- Valor de Serviciabilidad Final**

Tipo de Volumen TPD	Serviciabilidad Final
Volumen Alto (>10.000 TPD)	3.0-3.5
Volumen Medio (3,000-10,000 TPD)	2.5-3.0
Bajo Volumen (< 3,000 TPD)	2.0-2.5

Fuente: Guía de Diseño AASHTO 93

El cambio total en el índice de serviciabilidad ( PSI) viene dado por:

$$PSI = P_0 - P_t \quad (\text{Ec. 3.5})$$

#### **f.- Propiedades del concreto (Módulo de elasticidad y módulo de ruptura)**

Las propiedades del concreto que influyen en el diseño de una estructura de pavimento se detallan a continuación:

El **módulo de elasticidad** del concreto ( $E_c$ ), es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico, es la pendiente de la línea definida por dos puntos de la curva del esfuerzo-deformación, dentro de esta zona elástica. El valor del módulo de elasticidad del concreto de peso normal se puede obtener según ASTM C39 ó AASHTO T22, T140; o en función del esfuerzo a compresión ( $f'_c$ ) a una edad de 28 días, según el American Concrete Institute, (ACI).

$$E_c = 57\,000 (f'_c)^{0.5} \text{ [psi]}$$

$$E_c = 150\,000 (f'_c)^{0.5} \text{ [kPa]} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Dónde:

$E_c$  = Módulo Elástico promedio del hormigón.

$f'_c$  = Resistencia a la compresión

$S'_c$  = Módulo de ruptura del hormigón a los 28 días.

Es importante recalcar que estos valores, típicamente situados en un rango entre 21,000 a 35,000 MPa, son simplemente una aproximación para efectos de diseño con un razonable margen de error. El valor promedio obtenido en el AASHTO Road Test fue de 29,000 MPa.

El **módulo de ruptura** del hormigón ( $S'_c$ ) es el esfuerzo de tracción por flexión en la fibra extrema bajo la carga de rotura de acuerdo con el método de ensayo AASHTO T-97 cuyo equivalente es ASTM C 78, ensayo que utiliza vigas prismáticas de 15x15cm de sección transversal, con una longitud de ensayo de 45cm y carga en los tercios centrales y se evalúa mediante la resistencia a los 28 días.

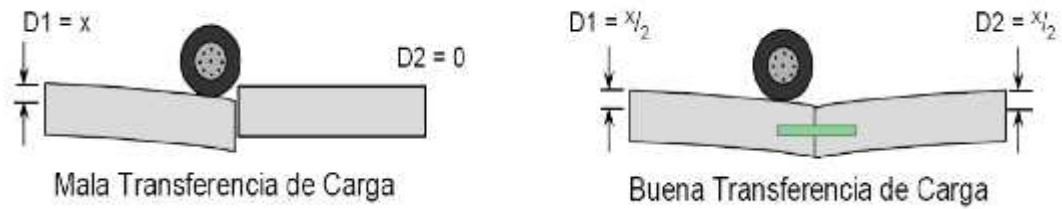
Para establecer una correlación confiable con cilindros sometidos a la compresión, debe realizarse un estudio en cada caso ya que son altamente dependientes del tamaño y la forma de los agregados y del tipo de cemento, por este motivo, no se considera aconsejables derivar correlaciones flexión – compresión sin un estudio apropiado de laboratorio.

#### **g.- Coeficiente de transferencia de carga (J)**

El coeficiente J representa la eficiencia de transferencia de carga que tiene una losa del pavimento al transmitir fuerzas cortantes a las losas adyacentes, esto tiene por objeto minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento.

La transferencia de carga comúnmente se da por medio de barras de acero lisas incrustadas en las losas en las juntas transversales, (aunque puede haber otros tipos de mecanismos de transferencia de carga, como la transferencia a partir de la trabazón de agregados), tal como lo muestra la figura 3.2. El valor del coeficiente de transferencia de carga se obtiene por medio de la tabla 3.5.

**Figura. 3.2.- Esquema de la transferencia de carga entre losas vecinas**



**TABLA 3.6.- Coeficiente de Transferencia de Carga**

Coeficiente de transferencia de carga recomendada para varios tipos de pavimento y condiciones de diseño				
Berma	Asfalto		Concreto de Cemento Portland	
Dispositivo de transferencia de carga	SI	NO	SI	NO
<b>Tipo de pavimento</b>				
1.- Juntas simples y juntas reforzadas	3.2	3.8 - 4.4	2.5 - 2.9	3.6 - 4.2
2.- Continuamente Reforzada	2.9 - 3.2	N / A	2.3 - 2.9	N/A

Fuente: Guía de Diseño AASHTO 93

#### **h.- Coeficiente de drenaje (Cd)**

El coeficiente de drenaje fue incorporado en la guía AASHTO para diseño de pavimentos rígidos a raíz de los efectos del drenaje en el desempeño de la estructura de pavimento, tales como el efecto de la humedad en la resistencia de la subrasante y en la erosionabilidad de la subbase. Para obtener el valor del coeficiente de drenaje ver tablas 3.7 y 3.8.

**TABLA 3.7.- Calidad de Drenaje en función al Tiempo en que alcanza 85 % de Saturación**

<b>Drenaje</b>	
<b>Calidad de drenaje</b>	<b>agua removida en:</b>
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	Nunca drena el agua

Fuente: Guía de Diseño AASHTO, Parte I, Sección 1.8  
 Guía de Diseño AASHTO, Parte II, Sección 2.4.1

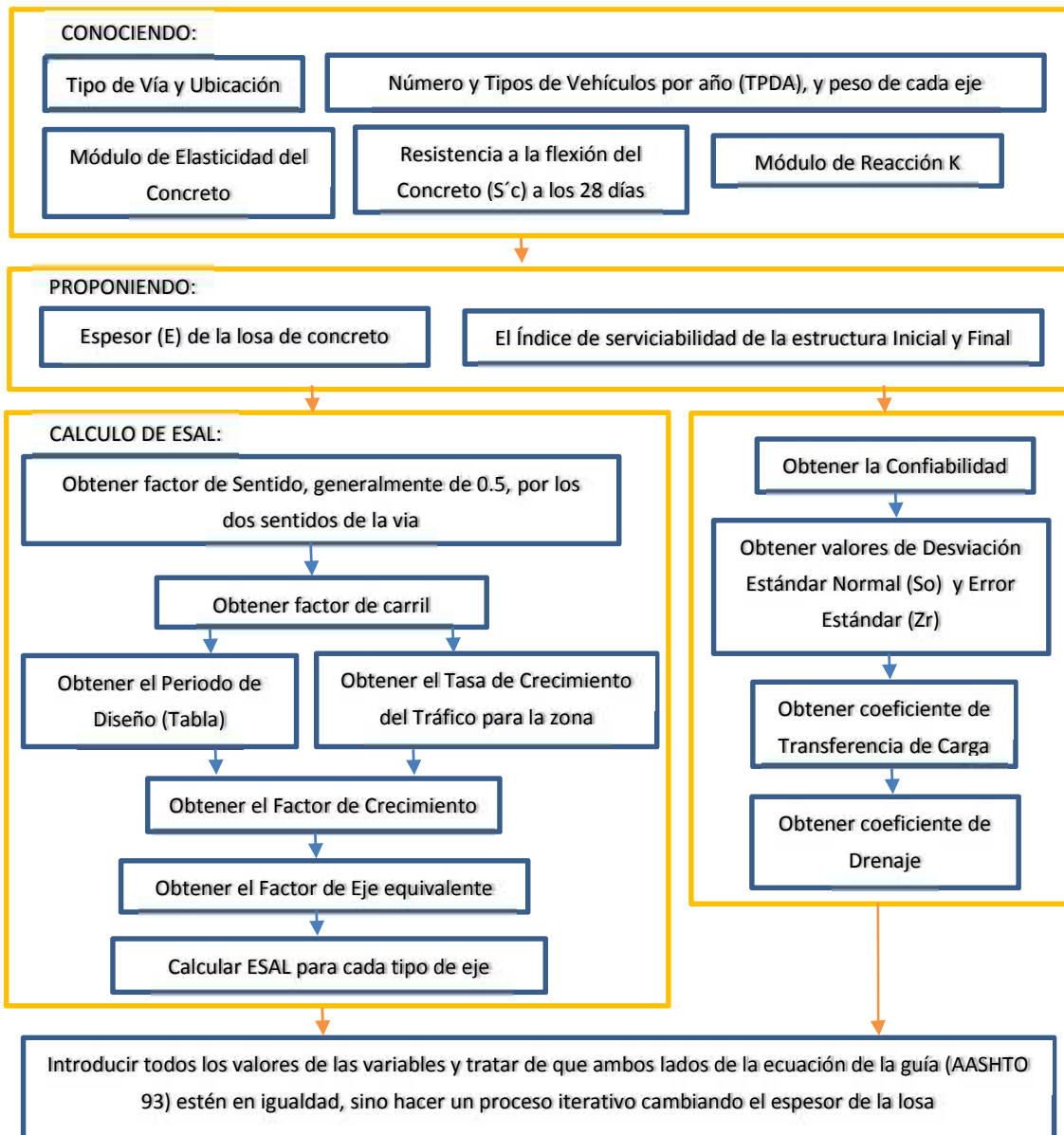
**TABLA 3.8.- Coeficiente de Drenaje**

<b>Coeficiente de Drenaje</b>				
<b>Calidad de drenaje</b>	<b>Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento se encuentra en niveles de humedad cercanos a la saturación.</b>			
	<b>menos del 1%</b>	<b>1 - 5%</b>	<b>5 - 25 %</b>	<b>Más de 25%</b>
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Bueno	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Regular	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Pobre	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy Pobre	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Fuente: Guía de Diseño AASHTO, Parte I, Sección 1.8  
 Guía de Diseño AASHTO, Parte II, Sección 2.4.1

Es importante recalcar que pavimentos nuevos con valores Cd menores a 1.0 no deberían construirse.

### 3.3.1.3.- Flujograma de diseño



### **3.4.- Métodos Mecanicistas**

#### **3.4.1.- Método De Diseño: PCA 84**

##### **3.4.1.1.- Reseña Histórica**

La reseña histórica que se indica a continuación, está basada en los aspectos indicados en la Transportation Research Circular número E-C118 publicada por la Transportation Research Board of the National Academies, donde se indica, entre otros, que en 1966 la PCA introdujo el primer procedimiento mecanístico-empírico para el diseño de espesores de pavimentos de concreto. El método fue desarrollado por P. Fordyce y R. Packard para pavimentos de concreto simple, con juntas y sin dovelas, basados en los análisis desarrollados por Westergaard y presentándolos en cartas de influencia realizadas por Pickett y Ray; los resultados permitían seleccionar un espesor basado en consideraciones de daño acumulado en fatiga. Posteriormente los resultados de la AASHO Road Test permitieron calibrar la metodología para el diseño. Posteriormente la metodología de diseño fue mejorada a través de recomendaciones de investigadores como E. J. Yoder, G. Ray, R. Packard y B. Colley de la PCA, con la llegada de las computadoras y el desarrollo de la metodología de elemento finito, los procedimientos de diseño incluyeron la influencia de barras de dovela y del confinamiento lateral. En 1977 Darter y Barenberg desarrollaron un procedimiento de diseño para la Federal Highway Administration (FHWA) y Tayabji, Colley y Packard para la PCA en 1984, considerando además de la fatiga, los efectos de bombeo o “pumping”; con este procedimiento la PCA introdujo una nueva metodología de diseño en 1984 (la versión vigente del método), basado en un análisis de elemento finito, no solamente considerando fatiga sino que también considerando el criterio de erosión. Así mismo, la metodología permitió considerar el uso de dovelas en juntas y de elementos para dar apoyo lateral a la losa de concreto.

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

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

#### **3.4.1.2.- Criterios de diseño del método de la PCA**

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

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

A continuación se indican los principales aspectos relacionados con cada uno de los criterios de falla antes referidos.

##### **➤ Erosión**

El criterio de erosión es utilizado para limitar la deflexión que se produce en los bordes de las losas de concreto, juntas y esquinas del pavimento por efecto del bombeo. El bombeo es definido por la University of Washington of Civil and Environmental Engineering, (WSDOT Pavement Design), como “el movimiento de material por debajo de la losa de concreto o eyección de material desde abajo de la losa, como

resultado de la presión del agua. El agua acumulada por debajo de la losa será presurizada cuando la losa flexione debido a carga”.

El bombeo ocurre debido a muchas repeticiones de cargas de ejes pesados en las esquinas de la losa de concreto y bordes, erosión de subrasante, subbase, y materiales del hombro; lo cual genera huecos bajo y junto a la losa.

La erosión se cuantifica en términos de porcentaje del daño total por erosión, se recomienda optimizar el diseño obteniendo un valor cercano al 100%, ya que si se tienen valores menores a dicho porcentaje, se estaría determinando una estructura sobrediseñada.

#### ➤ **Fatiga**

El análisis del criterio de fatiga es utilizado para evaluar los esfuerzos producidos en las losas del pavimento, ante la aplicación de cargas sobre las losas, lo cual puede producir esfuerzos excesivos, que generan agrietamientos. El objetivo es mantener los esfuerzos en el concreto, que constituye la losa, dentro de los límites de seguridad, basándose en el factor de relación de esfuerzos, el cual corresponde al esfuerzo de flexión dividido entre el módulo de ruptura del concreto a los 28 días.

La fatiga se cuantifica en términos de porcentaje de absorción de la fatiga, se recomienda optimizar el diseño obteniendo un valor cercano al 100%, ya que si se tienen valores menores a dicho porcentaje, se estaría determinando una estructura sobrediseñada.

Asimismo, algunos aspectos de diseño, adicionales a la determinación del espesor, tomados en cuenta por el método de diseño de la PCA, para asegurar el funcionamiento y la vida de los pavimentos de concreto, se mencionan a continuación:

- Soporte razonablemente uniforme.
- Prevención de bombeo en subbase relativamente delgada no tratada o tratada con cemento, en proyectos donde el tráfico pesado esperado sea lo suficientemente grande, causando bombeo.

- Uso de un diseño de junta que proporcionará adecuada transferencia de carga; que permita el uso de selladores en las juntas de ser requeridos para la efectividad de las mismas.
- Uso de un diseño de mezcla de concreto y agregados que proveerán concreto de calidad con la resistencia y durabilidad necesaria para una larga vida bajo, las condiciones de exposición actuales.

#### **3.4.1.3.- Factores de Diseño**

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

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

##### **a.- Resistencia a la flexión del concreto**

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. Se obtiene mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de 6 in x 6 in (150 mm x 150 mm) de sección transversal y un claro de al menos tres veces el espesor; la resistencia a la flexión se expresa como el módulo de ruptura y es determinada mediante el método de ensayo ASTM C78 (cargada en los puntos tercios).

La consideración de la resistencia a la flexión del concreto se aplica en el procedimiento de diseño para el criterio de fatiga, la cual controla el agrietamiento del pavimento sujeto a cargas repetitivas de tráfico pesado.

### b.- Soporte de la subbase y de la subrasante

El soporte de la subbase y de la subrasante se define en términos del módulo de reacción de la subrasante (K), el cual corresponde a la carga aplicada (libras) en un área (in<sup>2</sup>) cargada (un plato de 30 in de diámetro) dividida entre la deflexión producida ante dicha carga (in).

Las variaciones normales de un valor estimado no afectarán apreciablemente los requerimientos de espesor del pavimento.

Cuando se utiliza una subbase se tiene un incremento en el valor k, el cual debe ser usado en el diseño del espesor. Las tablas proporcionadas por la PCA para determinar dicho incremento se encuentran en la tabla 3.9.

**TABLA 3.9.- Efecto de subbase no tratada en el módulo de reacción**

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

Fuente: Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements, PCA 1984

**TABLA 3.10.- Efecto de subbase tratada con cemento en el módulo de reacción**

Valor de K de la subrasante, pci	Valor de la subbase k, pci			
	4 plg.	6 plg.	9 plg.	12 plg.
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	-

Fuente: Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements, PCA 1984

### **c.- Periodo de diseño**

En la publicación de la PCA, el término periodo de diseño es usado en lugar del término vida del pavimento. El término periodo de diseño es algunas veces considerado como sinónimo del término periodo de análisis de tráfico. El periodo de diseño seleccionado interviene en el diseño del espesor, ya que determina la cantidad de años que el pavimento debe funcionar desempeñándose adecuadamente, y por lo tanto determina también, la cantidad de tráfico pesado que debe soportar el pavimento.

### **d.- Tráfico**

El número y pesos de cargas por ejes pesados esperados durante el periodo de diseño, son factores importantes en el diseño de espesores de pavimentos de concreto. Estos se derivan de estimados de las siguientes cargas de tráfico: ADT (tráfico promedio diario en ambas direcciones, todos los vehículos, “Average Daily Traffic”); ADTT (tráfico pesado promedio diario en ambas direcciones, “Average Daily Truck Traffic”) y de cargas por ejes de tráfico pesado.

La información referente al tráfico es empleada para determinar el número de repeticiones esperadas de cada tipo de eje durante todo el periodo de diseño. Para poder conocer estos valores tendremos que conocer varios factores referentes al tránsito, como lo son el tránsito promedio diario anual (TPDA), el porcentaje que representa cada tipo de eje en el TPDA, el factor de crecimiento del tráfico, el factor de sentido, el factor de carril y el período de diseño, los cuales se muestran en la ecuación 2.1.

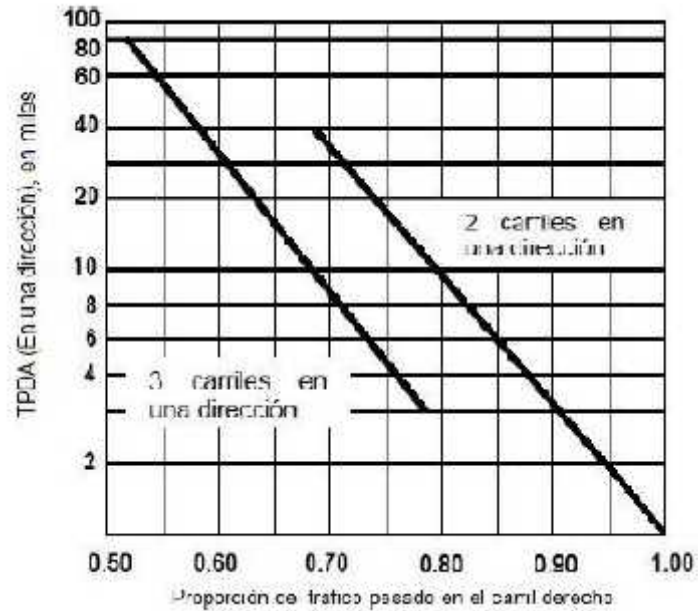
$$Re = TPDA * \%Tipo\ de\ eje * F\ Sentido * F\ Carril * P\ diseño * F\ Crecimiento\ Anual * 365$$

(Ec. 3.7)

#### **d.1.- Factor de Sentido**

El factor de sentido, en la mayoría de casos, se asume que los pesos y volúmenes de vehículos pesados viajando en cada dirección son iguales, por lo que se considera un factor de sentido igual a 0.5. Si la vía será de un solo sentido, el factor será igual a 1.0. Se debe analizar el número de carriles por sentido mediante el factor de carril, para lo cual la PCA recomienda utilizar la figura 3.3.

**Figura 3.3.-Proporción de Tráfico Pesado en el carril derecho de una carretera de 2 o 3 carriles**



Fuente: Guía de Diseño PCA 1984

#### **d.2.- Factor de Crecimiento Anual**

Para obtener el factor de crecimiento anual se utiliza la siguiente fórmula:

$$FC = \frac{(1+g)^n - 1}{g \cdot n} \quad (\text{Ec 3.8})$$

Donde:

FC = Factor de Crecimiento Anual.

n = Vida útil en años.

g = Tasa de crecimiento anual, en %

El método de diseño de la PCA recomienda considerar únicamente el tráfico pesado, es decir que se desprece todo el tráfico ligero como automóviles, paneles y pick-ups.

**e.- Factores de seguridad para las cargas.**

El método de diseño exige que las cargas reales esperadas se multipliquen por factores de seguridad de carga (FSC o LSF por sus siglas en inglés, Load Security Factor), la PCA recomienda los siguientes:

- Para vías interestatales y otros proyectos multicarril, donde se espera un flujo de tránsito ininterrumpido, con un alto volumen de tránsito pesado, utilizar un LSF de 1.2.
- Para autopistas y arterias principales donde se espera un volumen moderado de tránsito pesado, utilizar un LSF de 1.1.
- Para caminos, calles residenciales, y otras vías que soportarán bajos volúmenes de tránsito pesado, utilizar un LSF de 1.0.
- En casos especiales, podría justificarse el uso de un factor de seguridad de carga tan alto como 1.3, para mantener un nivel de serviciabilidad mayor que el normal a través del periodo de diseño.

### 3.4.1.4.- Formulario para el procedimiento de diseño por el método de la PCA edición 1984

**TABLA 3.11.- Esfuerzo equivalente para pavimentos sin apoyo lateral**

Espesor de Losa, (pulgadas)	Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem																				
	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	
4.0	825	679	510	726	585	456	671	542	437	634	516	428	584	466	419	523	457	414	484	443	412
4.5	699	586	439	616	500	380	571	460	359	540	435	349	498	406	339	448	378	331	417	363	328
5.0	602	516	387	531	436	328	493	399	305	467	376	293	433	348	282	390	321	272	363	307	269
5.5	526	461	347	464	387	290	431	353	266	409	331	253	373	305	240	343	275	230	320	264	226
6.0	465	416	315	411	348	261	382	316	237	362	296	223	336	271	209	304	246	198	285	232	193
6.5	417	380	289	367	317	238	341	286	214	324	267	201	300	244	186	273	220	173	256	207	168
7.0	375	349	267	331	290	219	307	262	196	292	244	183	272	222	167	246	199	154	231	186	148
7.5	340	323	247	300	268	203	279	241	181	265	224	168	246	203	153	224	181	139	210	169	132
8.0	311	300	230	274	249	189	255	223	168	242	208	156	225	188	141	205	167	126	192	155	120
8.5	285	281	215	252	232	177	234	208	158	222	193	145	205	174	131	188	154	116	177	143	109
9.0	264	264	200	232	218	166	216	195	148	205	181	136	190	163	122	174	144	108	163	133	101
9.5	245	248	187	215	205	157	200	183	140	190	170	129	176	153	115	161	134	101	151	124	93
10.0	228	235	174	200	193	148	186	173	132	177	160	122	164	144	108	150	126	95	141	117	87
10.5	213	222	163	187	183	140	174	164	125	165	151	115	153	136	103	140	119	89	132	110	82
11.0	200	211	153	175	174	132	163	155	119	154	143	110	144	128	98	131	113	85	123	104	78
11.5	188	201	142	165	166	125	153	148	113	145	136	104	135	122	93	123	107	80	116	98	74
12.0	177	192	133	155	158	119	144	141	108	137	130	100	127	116	89	116	102	77	109	93	70
12.5	168	183	123	147	151	113	136	135	103	129	124	95	120	111	85	109	97	73	103	89	67
13.0	159	176	114	139	144	107	129	129	98	122	119	91	113	106	81	103	93	70	97	85	64
13.5	152	168	105	132	138	101	122	123	93	116	114	87	107	102	78	98	89	67	92	81	61
14.0	144	162	97	125	133	96	116	118	89	110	109	83	102	98	75	93	85	65	88	78	59

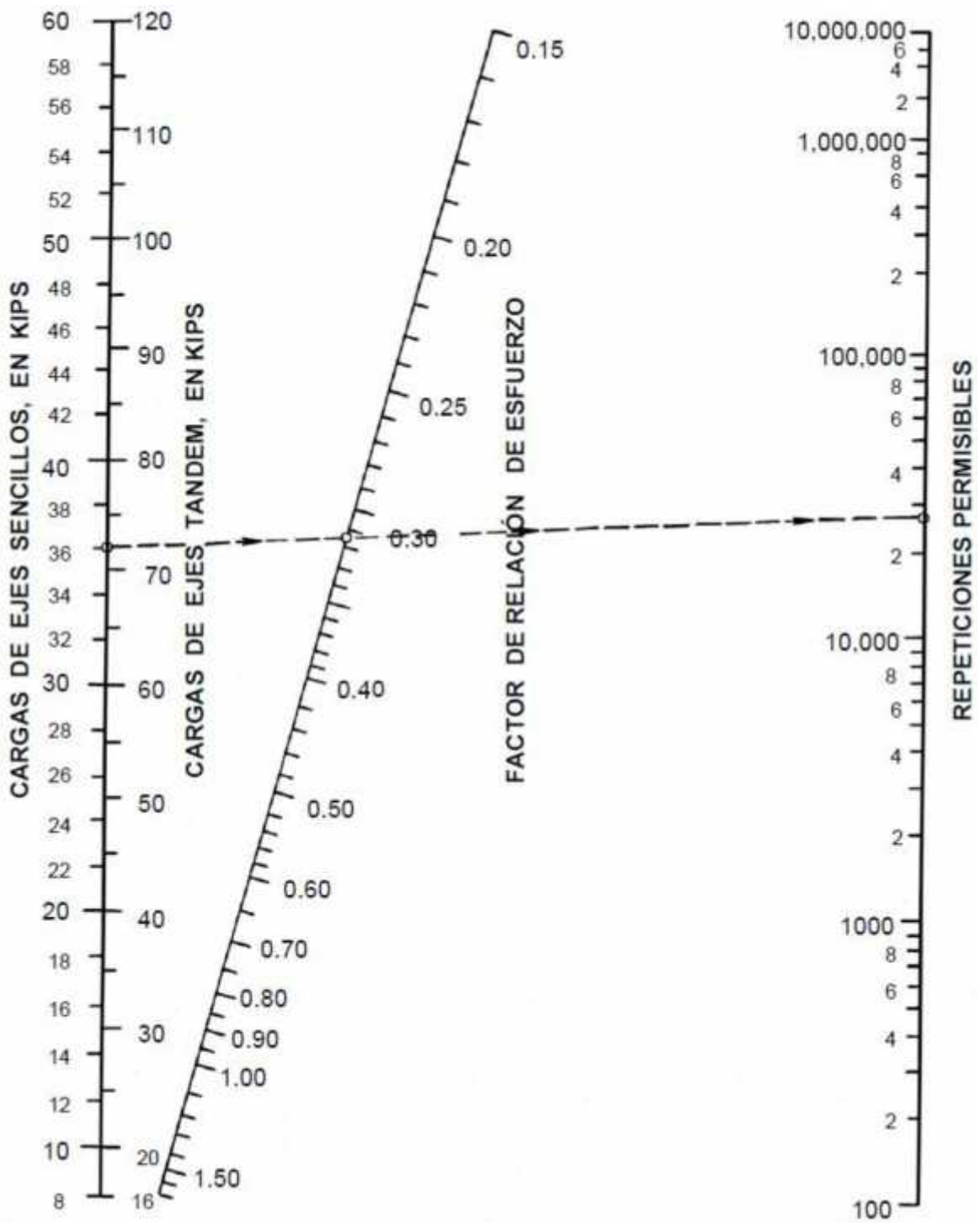
Fuente: Guia CEMEX 2000

**TABLA 3.12.- Esfuerzo equivalente para pavimentos con apoyo lateral**

Espesor de Losa, (pulgadas)	Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem																				
	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	
4.0	640	534	431	559	468	392	517	439	377	489	422	369	452	403	362	409	368	360	383	384	359
4.5	547	461	385	479	400	328	444	372	313	421	356	305	380	338	297	355	322	292	333	316	291
5.0	475	404	317	417	349	281	387	323	266	367	308	258	341	290	250	311	274	244	294	267	242
5.5	418	360	279	368	309	248	342	285	231	324	271	223	302	254	214	276	238	208	261	231	206
6.0	372	325	249	327	277	218	304	255	204	289	241	196	270	225	187	247	210	180	234	203	178
6.5	334	295	225	294	251	196	274	230	183	260	218	175	243	203	166	223	188	159	212	180	156
7.0	302	270	204	266	230	178	248	210	165	238	198	158	220	184	149	203	170	142	192	162	138
7.5	275	250	187	243	211	162	226	193	151	215	182	143	201	168	135	185	155	127	176	148	124
8.0	252	232	172	222	196	149	207	179	138	197	168	131	185	155	123	170	142	116	162	135	112
8.5	232	216	159	205	182	138	191	166	128	182	156	121	170	144	113	157	131	106	150	125	102
9.0	215	202	147	190	171	128	177	155	119	169	146	117	158	134	105	146	122	98	139	116	94
9.5	200	190	137	176	160	120	164	146	111	157	137	105	147	126	98	136	114	91	129	108	87
10.0	186	179	127	164	151	112	153	137	104	146	129	98	137	118	91	127	107	84	121	101	81
10.5	174	170	119	154	143	103	144	130	97	137	121	92	128	111	86	119	101	79	113	95	76
11.0	164	161	111	144	135	99	135	123	92	129	115	87	120	105	81	112	95	74	108	90	71
11.5	154	153	104	136	128	93	127	117	86	121	109	82	113	100	76	105	90	70	100	85	67
12.0	145	146	97	128	122	88	120	111	82	114	104	78	107	95	72	99	86	66	95	81	63
12.5	137	139	91	121	117	83	113	106	78	108	99	74	101	91	68	84	72	63	90	77	60
13.0	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	78	60	85	73	57
13.5	124	124	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54
14.0	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51

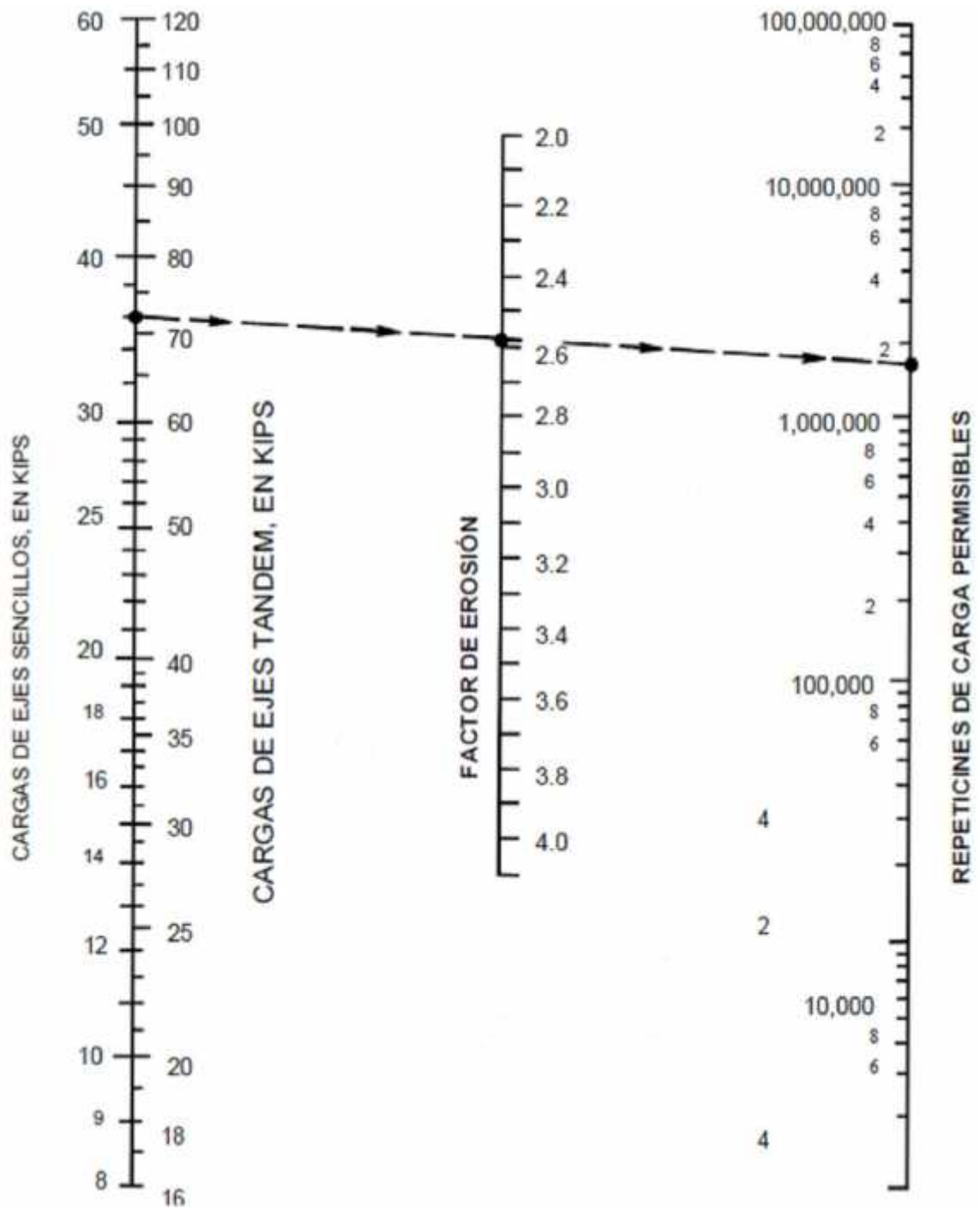
Fuente: Guia CEMEX 2000

Figura 3.4.- Análisis de Fatiga. Repeticiones admisibles basadas en la relación de esfuerzos en pavimentos con y sin hombros de concreto.



Fuente: Adaptado de PCA edición 1984, p.15

**Figura 3.5.- Análisis de Erosión, sin hombros de concreto. Repeticiones admisibles en el factor de erosión.**



Fuente: Adaptado de PCA edición 1984, p.17



**Tabla 3.13.- Factores de erosión para pavimentos con pasajuntas y sin apoyo lateral**

Espesor de Losa, (pulgadas)	Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem																	
	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.74	3.83	3.89	3.73	3.79	3.62	3.72	3.75	3.75	3.71	3.73	3.70	3.70	3.70	3.61	3.68	3.67	3.53
4.5	3.59	3.70	3.78	3.57	3.65	3.69	3.56	3.61	3.62	3.55	3.58	3.57	3.54	3.55	3.50	3.52	3.53	3.44
5.0	3.45	3.58	3.68	3.43	3.52	3.58	3.42	3.48	3.50	3.41	3.45	3.46	3.40	3.42	3.40	3.38	3.40	3.34
5.5	3.33	3.47	3.59	3.31	3.41	3.49	3.29	3.36	3.40	3.28	3.33	3.36	3.27	3.30	3.30	3.26	3.28	3.25
6.0	3.22	3.38	3.51	3.19	3.31	3.40	3.18	3.26	3.31	3.17	3.23	3.26	3.15	3.20	3.21	3.14	3.17	3.16
6.5	3.11	3.29	3.44	3.09	3.22	3.33	3.07	3.16	3.23	3.06	3.13	3.18	3.05	3.10	3.12	3.03	3.07	3.08
7.0	3.02	3.21	3.37	2.99	3.14	3.26	2.97	3.08	3.16	2.96	3.05	3.10	2.95	3.01	3.04	2.94	2.98	3.00
7.5	2.93	3.14	3.31	2.91	3.06	3.20	2.88	3.00	3.09	2.87	2.97	3.03	2.86	2.93	2.97	2.84	2.90	2.93
8.0	2.85	3.07	3.26	2.82	2.99	3.14	2.80	2.93	3.03	2.79	2.89	2.97	2.77	2.85	2.90	2.76	2.82	2.86
8.5	2.77	3.01	3.20	2.74	2.93	3.09	2.72	2.86	2.97	2.71	2.82	2.91	2.69	2.78	2.84	2.68	2.75	2.79
9.0	2.70	2.96	3.15	2.67	2.87	3.04	2.65	2.80	2.92	2.63	2.76	2.86	2.62	2.71	2.78	2.61	2.68	2.73
9.5	2.63	2.90	3.11	2.60	2.81	2.99	2.58	2.74	2.87	2.56	2.70	2.81	2.55	2.65	2.73	2.54	2.62	2.68
10.0	2.56	2.85	3.06	2.54	2.76	2.94	2.51	2.68	2.83	2.50	2.64	2.76	2.48	2.59	2.68	2.47	2.56	2.63
10.5	2.50	2.81	3.02	2.47	2.71	2.90	2.45	2.63	2.78	2.44	2.59	2.72	2.42	2.54	2.64	2.41	2.51	2.58
11.0	2.44	2.76	2.98	2.42	2.67	2.86	2.39	2.58	2.74	2.38	2.54	2.68	2.36	2.49	2.59	2.35	2.45	2.54
11.5	2.38	2.72	2.94	2.36	2.62	2.82	2.33	2.54	2.70	2.32	2.49	2.64	2.30	2.44	2.55	2.29	2.40	2.50
12.0	2.33	2.68	2.91	2.30	2.58	2.79	2.28	2.49	2.67	2.26	2.44	2.60	2.25	2.39	2.51	2.23	2.36	2.46
12.5	2.28	2.64	2.87	2.25	2.54	2.75	2.23	2.45	2.63	2.21	2.40	2.56	2.19	2.35	2.48	2.18	2.31	2.42
13.0	2.23	2.61	2.84	2.20	2.50	2.72	2.18	2.41	2.60	2.16	2.36	2.53	2.14	2.30	2.44	2.13	2.27	2.39
13.5	2.18	2.57	2.81	2.15	2.47	2.68	2.13	2.37	2.56	2.11	2.32	2.49	2.09	2.26	2.41	2.08	2.23	2.35
14.0	2.13	2.54	2.78	2.11	2.43	2.65	2.08	2.34	2.53	2.07	2.29	2.46	2.05	2.23	2.38	2.03	2.19	2.32

Fuente: Guía CEMEX 2000

**Tabla 3.14.- Factores de erosión para pavimentos sin pasajuntas y sin apoyo lateral**

Espesor de Losa, (pulgadas)	Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem																	
	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.94	4.03	4.06	3.91	3.95	3.97	3.88	3.89	3.88	3.86	3.86	3.82	3.82	3.83	3.74	3.77	3.80	3.67
4.5	3.79	3.91	3.98	3.76	3.82	3.85	3.73	3.75	3.76	3.71	3.72	3.70	3.68	3.68	3.63	3.64	3.65	3.56
5.0	3.66	3.81	3.85	3.63	3.72	3.75	3.60	3.64	3.66	3.58	3.60	3.60	3.55	3.55	3.52	3.52	3.52	3.45
5.5	3.54	3.72	3.76	3.51	3.62	3.66	3.48	3.53	3.56	3.46	3.49	3.51	3.43	3.44	3.43	3.41	3.40	3.37
6.0	3.44	3.64	3.68	3.40	3.53	3.58	3.37	3.44	3.48	3.35	3.40	3.42	3.32	3.34	3.35	3.30	3.30	3.29
6.5	3.34	3.56	3.61	3.30	3.46	3.50	3.26	3.36	3.40	3.25	3.31	3.34	3.22	3.25	3.27	3.20	3.21	3.21
7.0	3.26	3.49	3.54	3.21	3.39	3.43	3.17	3.29	3.33	3.15	3.24	3.27	3.13	3.17	3.20	3.11	3.13	3.14
7.5	3.18	3.43	3.48	3.13	3.32	3.37	3.09	3.22	3.26	3.07	3.17	3.20	3.04	3.10	3.13	3.02	3.06	3.08
8.0	3.11	3.37	3.42	3.05	3.26	3.31	3.01	3.16	3.20	2.99	3.10	3.14	2.96	3.03	3.07	2.94	2.99	3.01
8.5	3.04	3.32	3.37	2.98	3.21	3.25	2.93	3.10	3.15	2.91	3.04	3.09	2.88	2.97	3.01	2.87	2.93	2.96
9.0	2.98	3.27	3.32	2.91	3.16	3.20	2.86	3.05	3.09	2.84	2.99	3.03	2.81	2.92	2.95	2.79	2.87	2.90
9.5	2.92	3.22	3.27	2.85	3.11	3.15	2.80	3.00	3.04	2.77	2.94	2.98	2.75	2.86	2.90	2.73	2.81	2.85
10.0	2.86	3.18	3.23	2.79	3.06	3.11	2.74	2.95	3.00	2.71	2.89	2.93	2.68	2.81	2.85	2.66	2.76	2.80
10.5	2.81	3.14	3.18	2.74	3.02	3.06	2.68	2.91	2.95	2.65	2.84	2.89	2.62	2.76	2.81	2.60	2.72	2.76
11.0	2.77	3.10	3.14	2.69	2.98	3.02	2.63	2.86	2.91	2.60	2.80	2.84	2.57	2.72	2.77	2.54	2.67	2.71
11.5	2.72	3.06	3.10	2.64	2.94	2.98	2.58	2.82	2.87	2.55	2.76	2.80	2.51	2.68	2.72	2.49	2.63	2.67
12.0	2.68	3.03	3.07	2.60	2.90	2.95	2.53	2.78	2.83	2.50	2.72	2.76	2.46	2.64	2.68	2.44	2.59	2.63
12.5	2.64	2.99	3.03	2.55	2.87	2.91	2.48	2.75	2.79	2.45	2.68	2.73	2.41	2.60	2.65	2.39	2.55	2.59
13.0	2.60	2.96	3.00	2.51	2.83	2.88	2.44	2.71	2.76	2.40	2.65	2.69	2.36	2.56	2.61	2.34	2.51	2.56
13.5	2.56	2.93	2.97	2.47	2.80	2.84	2.40	2.68	2.73	2.36	2.61	2.66	2.32	2.53	2.58	2.30	2.48	2.52
14.0	2.53	2.90	2.94	2.44	2.77	2.81	2.36	2.65	2.69	2.32	2.58	2.63	2.28	2.50	2.54	2.25	2.44	2.49

Fuente: Guía CEMEX 2000

**Tabla 3.15.- Factores de erosión para pavimentos con pasajuntas y con apoyo lateral**

Factores de Erosión - Con Pasajuntas - Con Apoyo Lateral  
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.28	3.30	3.33	3.24	3.20	3.20	3.21	3.13	3.13	3.19	3.10	3.10	3.15	3.09	3.05	3.12	3.08	3.00
4.5	3.13	3.19	3.24	3.09	3.08	3.10	3.06	3.00	2.99	3.04	2.96	2.95	3.01	3.01	2.91	2.98	2.91	2.87
5.0	3.01	3.09	3.16	2.97	2.98	3.01	2.93	2.89	2.89	2.90	2.84	2.83	2.87	2.87	2.79	2.85	2.77	2.75
5.5	2.90	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.80	2.79	2.74	2.74	2.76	2.76	2.67	2.73	2.65	2.64
6.0	2.79	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.70	2.71	2.73	2.68	2.65	2.66	2.65	2.65	2.58	2.63	2.54	2.54
6.5	2.70	2.86	2.97	2.65	2.75	2.82	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.55	2.50	2.52	2.45	2.45
7.0	2.62	2.79	2.92	2.56	2.68	2.76	2.52	2.56	2.62	2.49	2.50	2.53	2.46	2.46	2.43	2.43	2.38	2.37
7.5	2.53	2.73	2.87	2.48	2.62	2.72	2.44	2.50	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.38	2.37	2.35	2.31	2.31
8.0	2.45	2.68	2.83	2.41	2.56	2.67	2.36	2.44	2.51	2.33	2.38	2.42	2.30	2.30	2.32	2.27	2.24	2.25
8.5	2.39	2.63	2.79	2.34	2.51	2.63	2.29	2.39	2.47	2.26	2.32	2.38	2.22	2.22	2.22	2.20	2.18	2.20
9.0	2.32	2.57	2.75	2.27	2.46	2.59	2.22	2.34	2.43	2.19	2.27	2.34	2.16	2.16	2.23	2.13	2.13	2.15
9.5	2.26	2.52	2.71	2.21	2.41	2.55	2.16	2.29	2.39	2.13	2.22	2.30	2.09	2.09	2.18	2.07	2.08	2.11
10.0	2.20	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.10	2.25	2.35	2.07	2.18	2.26	2.03	2.03	2.15	2.01	2.03	2.07
10.5	2.15	2.43	2.64	2.09	2.32	2.48	2.04	2.20	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	1.97	2.11	1.95	1.99	2.04
11.0	2.10	2.39	2.60	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.20	1.92	1.92	2.08	1.89	1.95	2.00
11.5	2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.90	2.05	2.16	1.87	1.87	2.05	1.84	1.91	1.97
12.0	2.00	2.31	2.54	1.94	2.20	2.39	1.88	2.09	2.23	1.85	2.02	2.13	1.82	1.82	2.02	1.79	1.87	1.94
12.5	1.95	2.27	2.51	1.89	2.16	2.36	1.84	2.05	2.20	1.81	1.96	2.11	1.77	1.77	1.99	1.74	1.84	1.91
13.0	1.91	2.24	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.01	2.17	1.76	1.95	2.08	1.72	1.72	1.96	1.70	1.80	1.88
13.5	1.86	2.20	2.46	1.81	2.09	2.30	1.75	1.98	2.14	1.72	1.91	2.05	1.68	1.68	1.93	1.65	1.77	1.86
14.0	1.82	2.17	2.43	1.76	2.06	2.28	1.71	1.95	2.12	1.67	1.88	2.03	1.64	1.64	1.91	1.61	1.74	1.83

Fuente: Guia CEMEX 2000

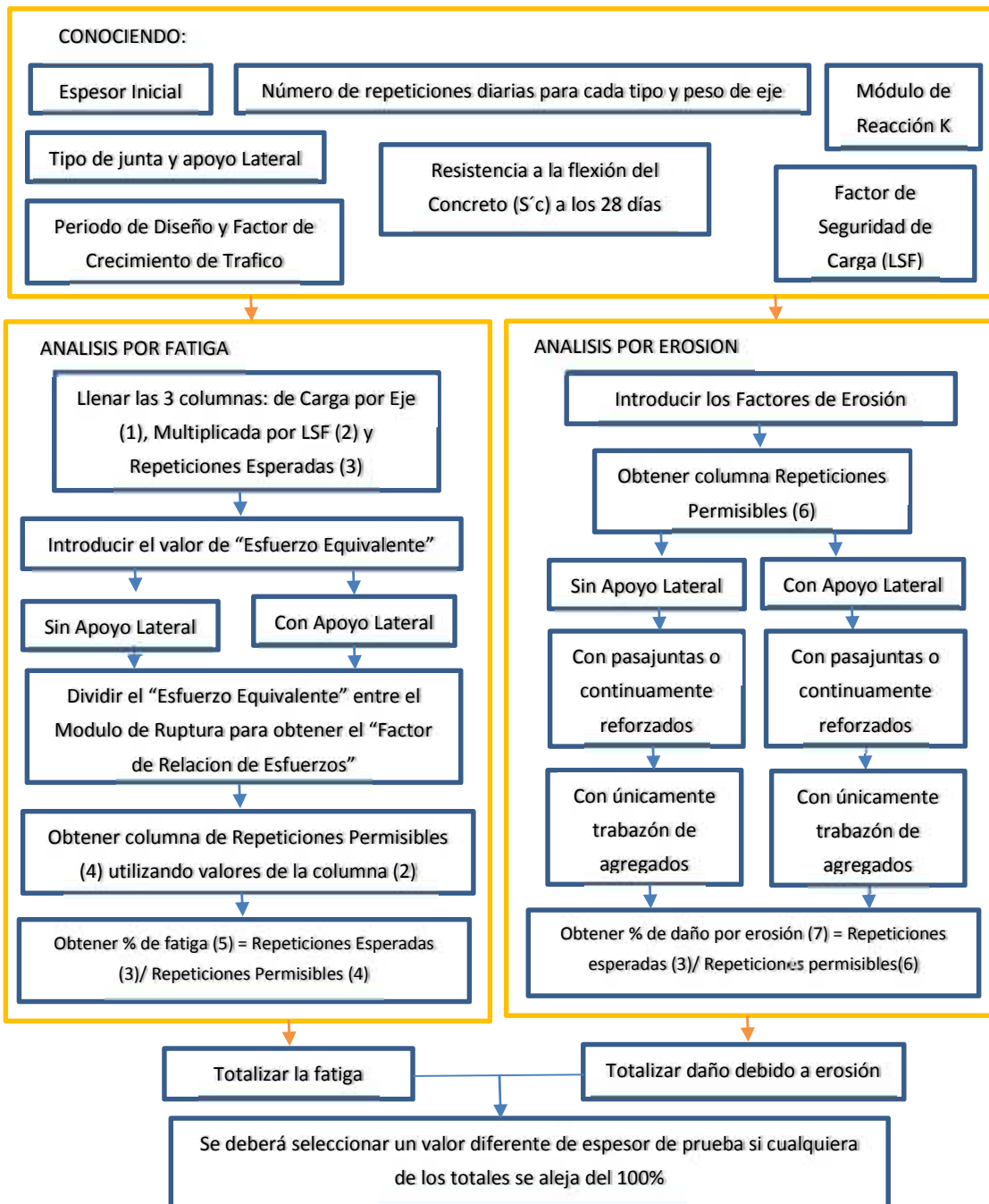
**Tabla 3.16.- Factores de erosión para pavimentos sin pasajuntas y con apoyo lateral**

Factores de Erosión - Sin Pasajuntas - Con Apoyo Lateral  
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.46	3.49	3.50	3.42	3.39	3.38	3.38	3.32	3.30	3.36	3.29	3.29	3.32	3.26	3.21	3.28	3.24	3.16
4.5	3.32	3.39	3.40	3.28	3.28	3.28	3.24	3.19	3.18	3.22	3.16	3.13	3.19	3.12	3.08	3.15	3.09	3.04
5.0	3.20	3.30	3.32	3.16	3.18	3.19	3.12	3.09	3.08	3.10	3.05	3.03	3.07	3.00	2.97	3.04	2.97	2.93
5.5	3.10	3.22	3.26	3.05	3.10	3.11	3.01	3.00	3.00	2.99	2.95	2.94	2.98	2.90	2.87	2.93	2.86	2.83
6.0	3.00	3.15	3.20	2.95	3.02	3.05	2.90	2.92	2.92	2.88	2.87	2.86	2.86	2.81	2.79	2.83	2.77	2.74
6.5	2.91	3.08	3.14	2.86	2.96	2.99	2.81	2.85	2.86	2.79	2.79	2.79	2.76	2.73	2.72	2.74	2.68	2.67
7.0	2.83	3.02	3.09	2.77	2.90	2.94	2.73	2.78	2.80	2.70	2.72	2.73	2.68	2.66	2.65	2.65	2.61	2.60
7.5	2.76	2.97	3.05	2.70	2.84	2.89	2.65	2.72	2.75	2.62	2.66	2.67	2.60	2.59	2.59	2.57	2.54	2.54
8.0	2.69	2.92	3.01	2.63	2.79	2.84	2.57	2.67	2.70	2.55	2.61	2.62	2.52	2.53	2.54	2.50	2.48	2.48
8.5	2.63	2.88	2.97	2.56	2.74	2.80	2.51	2.62	2.65	2.48	2.55	2.58	2.45	2.48	2.49	2.43	2.43	2.43
9.0	2.57	2.83	2.94	2.50	2.70	2.77	2.44	2.57	2.61	2.42	2.51	2.53	2.39	2.43	2.44	2.36	2.38	2.38
9.5	2.51	2.79	2.91	2.44	2.65	2.73	2.38	2.53	2.56	2.36	2.46	2.49	2.33	2.38	2.40	2.30	2.33	2.34
10.0	2.46	2.75	2.88	2.39	2.61	2.70	2.33	2.49	2.54	2.30	2.42	2.46	2.27	2.34	2.36	2.24	2.28	2.29
10.5	2.41	2.72	2.85	2.33	2.58	2.67	2.27	2.45	2.51	2.24	2.38	2.42	2.21	2.30	2.32	2.19	2.24	2.26
11.0	2.36	2.68	2.83	2.28	2.54	2.65	2.22	2.41	2.48	2.19	2.34	2.39	2.16	2.26	2.29	2.14	2.20	2.22
11.5	2.32	2.65	2.80	2.24	2.51	2.62	2.17	2.38	2.45	2.14	2.31	2.36	2.11	2.22	2.26	2.09	2.16	2.19
12.0	2.28	2.62	2.78	2.19	2.48	2.59	2.13	2.34	2.43	2.10	2.27	2.33	2.06	2.19	2.23	2.04	2.13	2.16
12.5	2.24	2.59	2.76	2.15	2.45	2.57	2.09	2.31	2.40	2.05	2.24	2.31	2.02	2.15	2.20	1.99	2.10	2.13
13.0	2.20	2.56	2.74	2.11	2.42	2.55	2.04	2.28	2.36	2.01	2.21	2.28	1.98	2.12	2.17	1.95	2.06	2.10
13.5	2.16	2.53	2.72	2.08	2.39	2.53	2.00	2.25	2.35	1.97	2.18	2.26	1.93	2.09	2.15	1.91	2.03	2.07
14.0	2.13	2.51	2.70	2.04	2.36	2.51	1.97	2.23	2.33	1.93	2.15	2.24	1.89	2.06	2.12	1.87	2.00	2.05

Fuente: Guia CEMEX 2000

### 3.4.1.5.- Flujograma de Diseño



### **3.4.2.- METODO DE DISEÑO: KENPAV-WESTERGAARD**

#### **3.4.2.1.- RESEÑA HISTORICA**

La metodología racional usada para el diseño de la estructura de pavimento, aunque fue desarrollada en Francia en 1994 (LCPC - Laboratorio Central de Puentes y Caminos), no limita las variables de diseño a las condiciones propias del país de origen. Por el contrario, fundamenta sus cálculos en factores externos, como lo es el tráfico, y factores internos, como lo son las características propias de los materiales que van a ser empleadas en la construcción de la calzada, dando resultados confiables que corresponden a las condiciones iniciales planteadas en el diseño. Cabe aclarar que los resultados obtenidos en Francia con el uso de esta metodología son excelentes, lo que indica que si el programa es usado correctamente para el diseño de vías en nuestro país, dará resultados favorables.

La metodología racional basada en el cálculo de esfuerzos y deformaciones en las interfaces de las capas del pavimento de concreto, o capas tratadas con cementantes, permiten el diseño óptimo y durable de pavimentos de concreto. El método hace uso de la teoría de la elasticidad, integrando modelos matemáticos de Hogg, Westergaard y Teorías de Placas. A nivel experimental se integra la medición de Módulos Elásticos y Leyes de Fatiga para el concreto, morteros fluidos y otras capas tratadas con cemento o cal.

Es un método muy utilizado en Colombia, en el cual hasta lo han mejorado para aplicaciones dentro de las condiciones del país.

#### **3.4.2.2.- Factores de diseño**

El análisis del funcionamiento de las calzadas reposa sobre tres dimensiones principales de elementos:

- El seguimiento experimental de secciones de calzadas y la observación a lo largo del tiempo.
- El estudio sobre el modelo matemático.
- El estudio del comportamiento de los materiales en laboratorio.

Los datos requeridos para el diseño de un pavimento se clasifican en dos categorías:

- **Tráfico**
- **Parámetros descriptivos de los materiales.**

#### **a.- Tráfico**

El conocimiento de los vehículos pesados (carga, clase, y tipo de ejes, número de ellos) intervienen en:

##### **a.1.- Clases de tráfico**

Estas se determinan a partir del tráfico de vehículos pesados por sentido, teniendo en cuenta el tránsito promedio diario para el carril más cargado en el año de puesta en servicio.

En el caso de las calzadas de dos carriles de ancho inferior a 6 m, incluyendo el recubrimiento de las bandas de rodadura, se aplicara la regla siguiente para el cálculo de tráfico anual diario promedio:

- Si el ancho es inferior a 5 m, asumir el 100% del tránsito total de los dos sentidos.
- Si el ancho está comprendido entre 5 y 6 m, asumir el 75% del tráfico total de los dos sentidos.

En el caso de vías que comprenden calzadas separadas, el carril más cargado es generalmente de vía lenta; si no se tiene información sobre la repartición probable del tráfico entre los carriles, se tomara como sigue:

#### **➤ Calzadas rurales**

- Vías de cuatro carriles. Se tomará 90% de los vehículos pesados en el sentido considerado y el 10% en el carril rápido.
- Si las vías son de 6 carriles, se consideran el 80 % en la vía lenta, el 20% en la vía media y 0% en la vía rápida o vía de sobrepaso.

### a.2.- Tráfico equivalente

Para el dimensionamiento del pavimento, el tránsito se expresa por número equivalente de ejes de referencia correspondiente al paso de los vehículos pesados acumulados en el periodo de diseño (vida útil).

El eje de referencia es un eje simple con ruedas gemelas, cuya carga es de 130 kN. El número de ejes equivalentes es función de los valores de los conteos del tránsito en el año de puesta en servicio de este, de la tasa de crecimiento durante el periodo de diseño, de la composición del tráfico y de la naturaleza de la estructura de la calzada. Se calcula teniendo en cuenta la siguiente relación:

$$NE = N \times CAM \text{ (factor camión)} \quad \text{Ec. (3.9)}$$

Donde:

**NE:** números de ejes equivalentes.

**N:** número acumulado de pesos pesados para el periodo de cálculo de  $P$  años

**CAM:** Agresividad media de los vehículos pesados en relación con el eje de referencia.

$$N = 365 \times MJA \times C \quad \text{Ec. (3.10)}$$

Donde:

**C:** Factor de proyección

**MJA:** Tránsito pesado promedio anual diario

Para  $n$  años y una tasa de crecimiento geométrica  $i$  constante sobre este periodo, se obtiene el valor de  $C$  por la fórmula siguiente:

$$C = \left[ \frac{(1 + i)^n - 1}{i} \right] \quad \text{Ec. (3.11)}$$

### a.3.- Valor del coeficiente de agresividad media (CAM)

La configuración de ejes (tandem, tridem) con ruedas (simples o gemelas) y su carga son variables de un vehículo pesado con respecto a otro. Para una carga dada, la cual depende de la naturaleza propia de los materiales.

Lo podemos calcular con la siguiente expresión:

$$CAM = \frac{1}{NPL} \left[ \sum_i \sum_{j=1}^3 K_i n_{ij} \left( \frac{P_i}{P_0} \right)^a \right] \quad \text{Ec. (3.12)}$$

Donde:

**NPL:** Numero de Pesos Pesados durante el Periodo de Conteo

**Ki:** Coeficiente según tipo de eje

**i=** 1 eje simple    2 eje tándem    3 eje tridem

**nij=** Numero de ejes elementales de Tipo j y de clase Pi

**Tabla 3.17.- Valores de la Agresividad para la formula en Estructuras Nuevas**

Tipo de Estructura		K		
		Eje Simple	Tandem	Tridem
<b>Estructura Flexible</b>	5	1	0.75	1.1
<b>Estructura Semirrígida</b>	12	1	12	113
<b>Estructura Rígida</b>				
<b>Placas</b>	12	1	12	113
<b>Concreto Armado</b>	12	1	-	-

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos, edición 2003

**Tabla 3.18.- Determinación del Coeficiente de Agresividad Media**

<b>Estructura</b>	<b>Coeficiente de Agresividad Media (CAM)</b>
Asfáltico h<20 cm	0.8
Asfáltico h = 20 cm	1.0
Semirrígido	1.3
Concreto	1.3
Suelo, grava no tratada o GRH	1.0
mixta material asfáltico	0.8
mixta material tratado con ligante hidráulico	1.3
Inversa material asfáltico	0.8
Inversa Grava recompuesta humidificada GRH	1.0
Inversa material con ligante hidráulico	1.3

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos, edición 2003

### **b.- Parámetros descriptivos de la plataforma de soporte ,subbase y losa de concreto**

#### **b.1.- Suelo soporte o subrasante**

Para los cálculos de las solicitaciones en el cuerpo del pavimento bajo el eje de referencias, el suelo soporte se asimila generalmente a un medio elástico definido por el módulo de Elasticidad y el coeficiente de poisson, parámetros mecánicos que definen el comportamiento a largo plazo para la parte superior de la subrasante; para el coeficiente de poisson se tomara un valor medio de 0.35, sabiendo que este parámetro varia con la naturaleza de los suelos, su estado hídrico y las solicitaciones aplicadas. Se recomienda tomar el módulo de Elasticidad como:

$$E = 5 \text{ CBR (MPa) o } 8.5 \text{ CBR}^{0.825} \text{ (MPa)} \quad (\text{Ec.3.13})$$

Para las estructuras de calzadas rígidas, el criterio de la resistencia se determina por las leyes de fatiga de las capas, la deformación admisible de la subrasante, , se puede tomar así:

**Tabla 3.19.- Ecuación de la deformación vertical admisible según el tráfico**

Tipo de trafico	Ecuación deformación Admisible
Pavimento con Tránsito Medio a Alto (T3 A T5)	$Z = 0.012(N)-0.222$
Pavimento con Tránsito Bajo (T1 Y T2)	$Z = 0.016(N)-0.222$

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos, edición 2003

### **b.2.- Capa de sub-base y losa de concreto**

En lo que concierne de la capa base y de la verificación del dimensionamiento del cuerpo de la calzada, se emplean una aproximación en la práctica.

La capa sub-base se individualiza como una capa de calzada más en el cálculo de la estructura, aproximación que resulta válida cuando se busca optimizar los espesores del conjunto de calzadas y de la capa de sub-base en función de las características mecánicas que pueden obtenerse en obra con los materiales de sub-base.

En este caso las características mecánicas de tales materiales deben determinarse estrictamente en laboratorio. Cuando se utilizan capas de sub-base en materiales no tratados, hay que verificar que los valores de la deformación vertical en la parte superior de la capa de la sub-base y del suelo soporte sean admisibles; igualmente, cuando se emplean materiales tratados se deben verificar las leyes de fatiga adoptando los modelos propios para el caso del material que se esté utilizando.

#### **b.2.1.- Variables de Diseño**

- **E:** Es el módulo de elasticidad del material en MPa.
- **$\nu$ :** Es el coeficiente de poisson del material.
- **$\sigma_6$  (10°C, 25Hz):** Es el esfuerzo para el cual la ruptura convencional en flexión.
- **-1/b:** Es la pendiente de la ley de fatiga del material.
- **SN:** Es la dispersión del material en el ensayo de fatiga.

- **Sh:** Es la dispersión del material por extendido en la construcción, dado en cm.
- **R:** Es el riesgo de ruina admitido para el periodo de diseño, dado en porcentaje.
- **H:** Es el espesor de la capa dado en m.

#### **a.- Módulo de Elasticidad “E”**

El módulo de elasticidad del concreto (E), es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico, es la pendiente de la línea definida por dos puntos de la curva del esfuerzo-deformación, dentro de esta zona elástica.

$$E_c = 150\,000 (f'_c)^{0.5} \text{ [kPa]} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Dónde:

$E_c$  = Módulo Elástico promedio del hormigón.

$f'_c$  = Resistencia a la compresión.

Es importante recalcar que estos valores, típicamente situados en un rango entre 21,000 a 35,000 MPa, son simplemente una aproximación para efectos de diseño con un razonable margen de error. El valor promedio obtenido en el AASHTO Road Test fue de 29,000 MPa.

#### **b.- Coeficiente de Poisson**

Es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. El nombre de dicho coeficiente se le dio en honor al físico francés Simeon Poisson.

**Tabla 3.20.- Coeficiente de poisson**

Material	Coeficiente de Poisson
Mezcla asfaltica densa	0,30 a 0,40
Materiales Granulares no-tratados	0,30 a 0,40
Suelos Finos	0,30 a 0,50
Suelos Arcillosos Saturados	0,40 a 0,50
Concreto	0.25 a 0.35

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos, edición 2003

### c.- Características de los Materiales

- $\sigma_6$  (10°C, 25Hz): Es el esfuerzo para el cual la ruptura convencional en flexión sobre la probeta es obtenida al aplicar  $1 \times 10^6$  ciclos a una temperatura de 10 °C y a una frecuencia de 25 Hz. Este valor es dado por  $10^6$ .
- $-1/b$ : Es la pendiente de la ley de fatiga del material.
- SN: Es la dispersión del material en el ensayo de fatiga.

**Tabla 3.21.- Características del Concreto**

	E (Mpa)	$\sigma_6$ (Mpa)	b	SN
Concreto	35000- 26000	2.15	-1/16	1
Concreto Pobre	26000 - 18000	1.63	-1/15	1

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos, edición 2003

### d.- Riesgo

Para las calzadas en concreto sobre una capa de fundación se considera que:

- En una primera fase, los desarrollos de las degradaciones en la capa subbase y en la capa de fundación son independientes.
- El comportamiento de la capa subbase no está influenciado por la degradación de la capa de fundación sino después de un cierto tiempo.

Por lo tanto:

- Para las estructuras en concreto armado en continuo y el concreto con o sin pasadores, el riesgo de cálculo  $r_2$  se toma igual al 50%.

**Tabla 3.22.- Valores de Riesgo “r”(%)**

		<b>T5</b>	<b>T4</b>	<b>T3</b>	<b>T2</b>
<b>Estructuras</b>	<b>MB</b>	2.0	5.0	12.0	25.0
	<b>MTLH</b>	2.5	5.0	7.5	12.0
<b>Estructuras Inversas</b>	<b>MB</b>	2.0	5.0	12.0	25.0
	<b>MTLH</b>	5.0	10.0	15.0	24.0
<b>Estructuras Mixta</b>	<b>MB</b>	2.0	15.0	12.0	25.0
	<b>MTLH</b>	3.0	10.0	20.0	35.0
<b>Estructuras en Asfalto CdBBase</b>		2.8	5.0	7.5	11.5
<b>Sub-Rasante salvo BAC y BCg</b>		5.6	10.0	15.0	23.0
<b>Sub-Rasante para BAC y BCg</b>		50.0	50.0	50.0	50.0

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos, edición 2003

- **Determinación del esfuerzo de tracción admisible  $t_{ad}$  en la capa subbase y la losa de concreto**

El valor de  $t_{ad}$  está dado por la relación:

$$t_{ad} = t ( N.E) k_r k_d k_c k_s \quad (\text{Ec 3.15})$$

- **t ( N.E):** Esfuerzo para la cual la ruptura en tracción por flexión es obtenida para N.E cargas.
- **N.E :** Número de cargas equivalentes calculadas a partir del tráfico acumulado y del coeficiente de agresividad CAM .

$$t(N.E) = t_0 (NE/10^6)^b \quad (\text{Ec. 3.16})$$

- **$k_r$**  es un coeficiente que ajusta el valor de la deformación admisible al riesgo de cálculo retenido en función de los factores de dispersión sobre el espesor (desviación estándar  $S_h$ ) y sobre los resultados de los ensayos de fatiga. (Desviación estándar  $S_N$ ).

$$k_r = 10^{-ub} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

- **u**: Variable centrada reducida asociada al riesgo r

**Tabla 3.23.- Valores de “u” asociados al Riesgo “r”**

r%	u	r%	u
1.0	-2.326	12.0	-1.175
.5	-2.710	15.0	-1.036
2.0	-2.054	20.0	-0,842
2.5	-1.960	23.0	-0.739
2.8	-1.911	24.0	-0.706
3.0	-1.881	25.0	-0.674
5.0	-1.645	30.0	-0.524
5.6	-1.590	35.0	-0385
7.5	-1.439	40.0	-0.253
10.0	-1.282	50.0	0.000
11.5	-1.200		

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos, edición 2003

- **b**: pendiente de la ley de fatiga del material (ley bi-logarítmica)
- **s**: desviación estándar de la distribución del Log N a la ruptura.

$$= [SN^2 + (c/b)^2 Sh]^0.5 \quad (\text{Ec. 3.18})$$

- **c**: coeficiente que relaciona la variación de los esfuerzos con la variación aleatoria del espesor de la calzada,  $h$ , ( $\log = \log_0 - C h$ ). Para las estructuras corrientes, el valor de **c** es de  $0.02\text{cm}^{-1}$
- **k<sub>d</sub>** es un coeficiente de calibración introducido para tener en cuenta las discontinuidades de las estructuras de las calzadas en concreto y la incidencia de los gradientes térmicos (mayoración del esfuerzo calculado en la mitad de la placa con el modelo continuo). los valores recomendados para tomar **k<sub>d</sub>** son los siguientes:

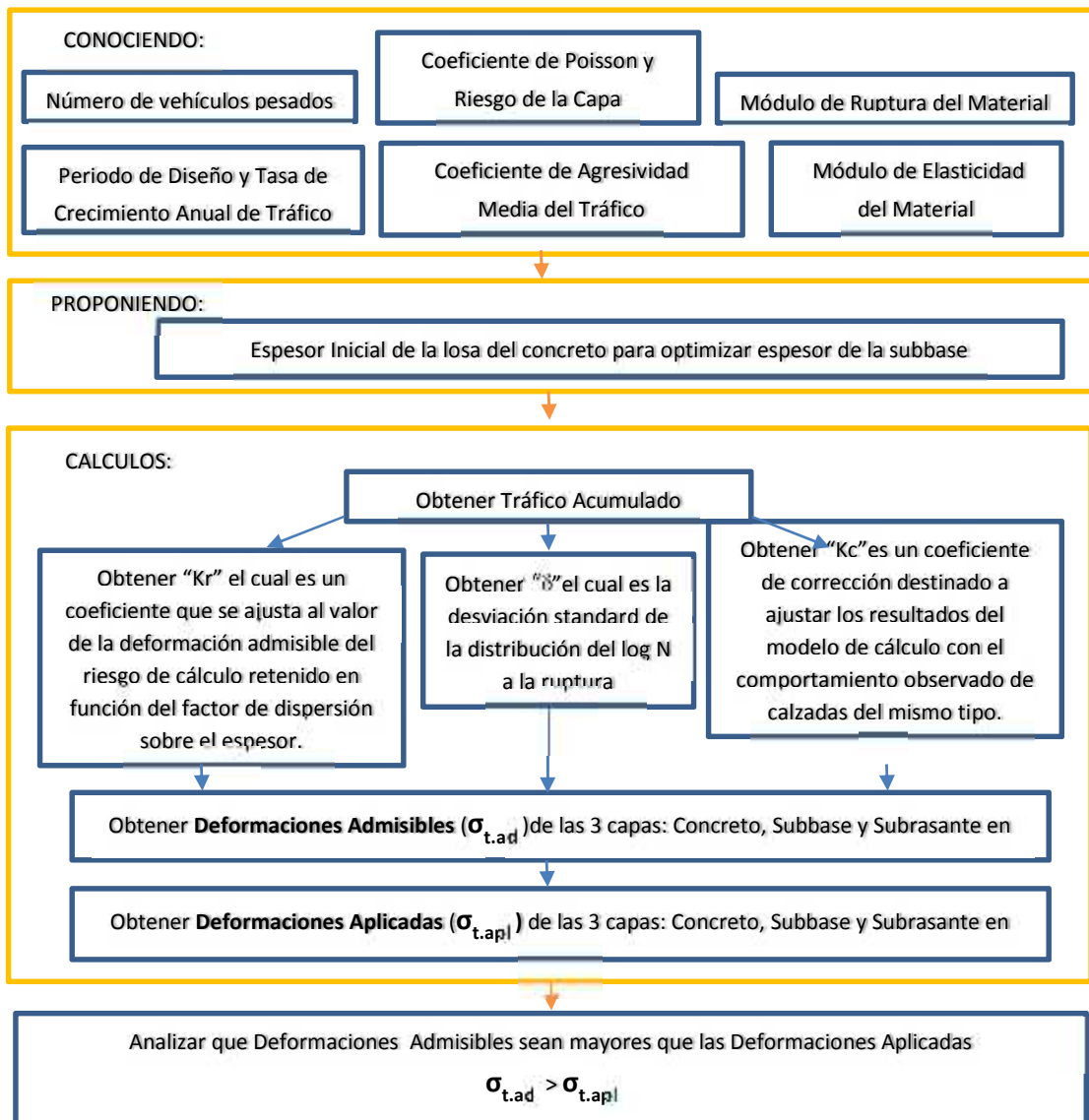
**Tabla 3.24.- Coeficiente  $k_d$  para las calzadas en concreto**

Tipo de Estructura	Kd
Estructuras sin Pasadores y no Armadas	1/1.70
Estructuras con Pasadores	1/1.47
Concreto armado continuo	1/1.47

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos, edición 2003

- **$k_c$**  es un coeficiente de corrección destinado a ajustar los resultados del modelo de cálculo con el comportamiento observado de calzadas del mismo tipo. Para las calzadas en concreto el valor actual que se toma para el coeficiente de corrección es 1.5 cuando se utilice la resistencia del concreto en tracción por flexión.
- **$k_s$** : Es un coeficiente de corrección que tiene en cuenta el efecto de las heterogeneidades locales de la portancia de la capa de baja rigidez que soporta a las capas tratadas.

### 3.4.2.3.- Flujograma de Diseño



### **3.5.- Métodos Empírico-Mecanicistas**

#### **3.5.1.- Método de diseño: AASHTO 2008**

##### **3.5.1.1.- Reseña Histórica**

En el año 1998 la AASHTO publicó una guía suplementaria de la guía para diseño de pavimentos proporcionado por la AASHTO de la edición 1993, contiene un procedimiento alternativo para diseño de pavimentos rígidos y diseño de juntas, en esta edición de la guía se incorporan factores como la relación de Poisson, características de la subbase, condiciones climáticas de la zona y cambios en la determinación del módulo de reacción de la subrasante, (K), así como también un procedimiento para verificar la aparición de fallas en las juntas, como el escalonamiento de las losas del pavimento.

En el año 2004 la AASHTO publicó la guía Mecánica-Empírica edición 2002, la cual incorpora entre otros las propiedades significativas del comportamiento de los materiales en el procedimiento de diseño, esta guía supera algunas de las deficiencias que tenían las anteriores publicaciones de la guía AASHTO con lo que respecta a: El incremento del tráfico y su caracterización (configuración de ejes, tipo y presión de neumáticos); Deficiencias climáticas; Deficiencias de construcción; Deficiencias de desempeño (falla de juntas, grietas por temperatura, etc.); Deficiencias de confiabilidad, en la actualidad se diseña para cantidades de tráfico mucho mayores a los de décadas anteriores, por lo que al multiplicarlos por valores grandes, como los que resultan de los procedimientos de ediciones previas, los espesores de los pavimentos resultarían sobre diseñados.

La guía Mecánica-Empírica edición 2008 se publicó a mediados del mismo año solo para los Estados Unidos, esta guía también incluye tecnología que considera directamente el comportamiento de los materiales a usar durante la vida útil y una relación directa entre construcción y especificaciones de los materiales y estructura de pavimento.

### **3.5.1.2.- Factores de Diseño**

El diseño mecánico-empírico de pavimentos rígidos nuevos y reconstruidos requiere un proceso iterativo de enfoque práctico por el diseñador. El diseñador debe seleccionar un diseño de ensayo y luego analizar el diseño en detalle para determinar si cumple con los criterios de desempeño establecidos por el diseñador.

Si el diseño del ensayo no cumple con los criterios de rendimiento, el diseño se debe modificar y volver a analizar hasta que el diseño cumpla con todos los criterios. Estos diseños deben atenerse a los criterios de rendimiento de un problema estructural y funcional y puede ser más considerado para otras evaluaciones, como el costo del ciclo de vida de análisis.

#### **3.5.1.2.1.- Información general**

El tipo y periodo de análisis se define con las siguientes entradas:

- Vida de diseño – Expectativa de vida de diseño del pavimento (años)
- Base / Mes construcción de subrasante - el mes aproximado en el que la base y el subsuelo se prevé que esté construido. Esta entrada establece el tiempo  $t=0$  para el modelo climático, la humedad del régimen dentro de las capas no consolidadas y sub-base, se supone que está en óptimas condiciones en este momento. La progresión de la humedad óptima para humedad de equilibrio comienza a partir de este momento. Si esta entrada es completamente desconocida, el diseñador debe utilizar el mes en que la mayoría de los pavimentos se construye en la zona.
- Meses de la construcción del pavimento (HMA) - Esta entrada define el tiempo  $t = 0$  para el HMA modelo material de envejecimiento y modelo térmico de formación de grietas. Si esta entrada es completamente desconocida, el diseñador puede utilizar el mes en el que la mayoría de los pavimentos se construye en la zona.

- Mes de apertura al tráfico - el mes en el que espera que el pavimento sea abierto al tráfico. Este valor define las condiciones climáticas en el momento de apertura al tráfico, que afecta a los gradientes de temperatura y humedad, así como los valores de módulos de capa, incluyendo sub-base. El análisis comienza con el mes introducido (es decir, primer día del mes). Esta entrada establece el tiempo  $t = 0$  para daños adicionales y cálculos incrementales de fallas. Si esta entrada es completamente desconocida, el diseñador debe utilizar el mes en que la mayoría de la construcción de los pavimentos se terminó en el lugar.
- Tipo de pavimento - Flexible. Esta entrada determina el método de diseño, las evaluaciones y los modelos de funcionamiento aplicables.

#### **3.5.1.2.2.- Identificación y sitio del proyecto.-**

Este grupo de entradas incluye lo siguiente:

- Ubicación del proyecto.
- Identificación de proyectos - Proyecto ID, ID de sección, la dirección del tráfico

La clase funcional del pavimento con el que se está diseñando, las opciones en esta opción son las siguientes:

- Arteria principal.
- Arterias menores.
- Grandes colectoras.
- Menor o colectoras.
- Rutas locales y calles.

La ubicación del proyecto define las condiciones climáticas para el diseño del pavimento, la clase funcional de las influencias de los criterios de diseño por defecto (nivel aceptable de falla y la fiabilidad), ayuda a determinar el valor por defecto (Nivel 3) distribución de la clase de vehículo, y también ayuda en la selección de la velocidad de operación del vehículo.

### **3.5.1.2.3.- Análisis de parámetros**

- **IRI inicial.-**

El IRI inicial define la rugosidad del pavimento tal como fue construido. Este parámetro

depende en gran medida de las especificaciones de la rugosidad del proyecto y tiene un impacto significativo en el largo plazo, calidad de marcha en el pavimento. Los valores típicos oscilan entre 50 y 100 pulg / mi.

- **Criterios de rendimiento.-**

El diseñador puede seleccionar algunos o todos estos indicadores de desempeño y establecer criterios para evaluar un diseño y hacer modificaciones si es necesario.

Los

criterios de rendimiento para cada dificultad dependerán de la habilidad de diseño del individuo y su tolerancia para la cantidad de grietas en el período de diseño. Los criterios de rendimiento también dependerán del nivel de fiabilidad del diseño que, a su vez, dependerá de la clase funcional de la carretera. Por ejemplo, especificar un nivel de confianza alto consistente con un diseño de la carretera interestatal y un bajo nivel de falla permitido resultará en un diseño muy conservador.

- **Superficie de agrietamiento por fatiga hacia abajo**

La superficie de agrietamiento por fatiga hacia abajo se manifiesta como grietas longitudinales en el borde de los caminos. Esto permite la infiltración del agua en la capa base de pavimento que puede ocasionar un fallo estructural del pavimento.

El criterio de rendimiento de la superficie de agrietamiento por fatiga hacia abajo, se define como la máxima longitud permitida de agrietamiento longitudinal por kilómetro de pavimento durante el período de diseño. Los valores típicos de grietas, se encuentran en el orden de los 1000 pies por milla de pavimento.

- **Agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba - Piel de cocodrilo**

El agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba se manifiesta en forma de piel de cocodrilo dentro de la huella del camino. Además permite la infiltración del agua en las capas del pavimento subyacente que puede ocasionar un fallo estructural del pavimento; también contribuye directamente a una pérdida de tersura. Un diseño inadecuado puede resultar en la falla prematura de los pavimentos flexibles. El criterio de desempeño se define como el área máxima de grietas cocodrilo expresado como porcentaje del área total de carril que está permitido durante el período de diseño. Los valores típicos son en el orden del 25 al 50 por ciento del área total de carril.

- **Fisuramiento térmico**

El fisuramiento térmico aparece regularmente como grietas transversales espaciadas a través de la superficie completa del pavimento. El fisuramiento térmico es ambientalmente inducido por fuertes caídas en la temperatura del pavimento que causan la contracción térmica extrema y la fractura de la superficie de asfalto. También permite la infiltración del agua en las capas subyacentes del pavimento y pueden ocasionar un fallo estructural del pavimento. El fisuramiento térmico contribuye directamente a una pérdida de tersura; el criterio de rendimiento para el fisuramiento térmico se define como la longitud máxima de formación de grietas transversales por kilómetro de pavimento permitida durante el período de diseño. Los valores típicos son del orden de 1000 pies por milla de pavimento.

- **Fractura por fatiga de las capas químicamente estabilizada**

El agrietamiento por fatiga en las capas subyacentes químicamente estabilizada reduce el apoyo prestado a la parte superior de las capas de pavimento. Esto acelerará la manifestación de fallas de la superficie, especialmente el agrietamiento por fatiga hacia abajo y de abajo hacia arriba en las capas de asfalto de la superficie. Esto dará lugar a una pérdida de tersura y puede conducir a un fallo prematuro del sistema de pavimento. El criterio de rendimiento se define en términos de un índice de daño. Los valores

típicos de índices de daño para la formación de grietas de fatiga en capas químicamente estabilizadas, son del orden de 25 por ciento.

- **La deformación total permanente**

La mayoría normalmente se manifiesta como surcos dentro de la huella del camino; es la acumulación de la deformación permanente en todas las capas de asfalto y no consolidadas en el sistema de pavimento. La deformación total permanente es un importante contribuyente a la pérdida de confort del pavimento. También puede crear problemas funcionales, tales como charcos de agua y el hidroplaneo del vehículo y por consiguiente problemas de manejo de vehículos durante los cambios de carril. El criterio de rendimiento se define en términos de la máxima profundidad del surco dejado en la trayectoria de la rueda. Las profundidades máximas son del orden de 0,3 a 0,5 pulgadas. Este valor límite es una función directa de la política específica que utiliza cada criterio de diseño.

- **Rugosidad**

La adecuación funcional se cuantifica con mayor frecuencia por la rugosidad del pavimento. Caminos en mal estado no sólo conducen a la incomodidad del usuario, sino también aumentan los tiempos de los viajes y costos de operación del vehículo. La rugosidad de manera simplista se puede definir como "la variación en la elevación de la superficie que induce vibraciones en los vehículos que atraviesan." El índice de rugosidad internacional (IRI) es una de las formas más comunes de medir la suavidad en el manejo de los pavimentos. Al igual que con la falla estructural, el criterio de desempeño para la rugosidad se define por el IRI aceptable al final de la vida de diseño. Los valores del IRI son elegidos por el diseñador y no debe excederse en el nivel de diseño de la confiabilidad. Normalmente, los valores son del rango de 150 a 250 pulg / milla.

#### **3.5.1.2.4.- Tráfico**

Los datos de tráfico son uno de los elementos clave requeridos para el análisis y diseño de las estructuras de pavimentos. La opción de tráfico estándar para el diseño de

pavimento flexible es especificar el espectro de la carga real de simple, doble, trídém. La segunda opción de tráfico de pavimentos flexibles es la configuración de ejes especiales. Esta opción permite el análisis del comportamiento del pavimento debido al sistema de vehículos, especial, pesada, no convencional, que están a menudo sujetos a permisos especiales. Esta es una característica muy importante de la Guía, ya que proporciona al diseñador la información sobre la cantidad de daño que podría ser causada por uno o varios pasos del vehículo especial, para la estructura del pavimento.

- **Información Básica.-**

- El promedio anual de tráfico de camiones diarios (TPDA) para el año base - el número total de vehículos pesados (clases de 4 a 13) en el flujo de tráfico.
- Porcentaje de camiones en la dirección del diseño (factor de distribución de dirección).
- Porcentaje de camiones en el carril de diseño (factor de carril de distribución).
- Velocidad de operación de los vehículos.

- **Velocidad de operación de vehículos.-**

La velocidad de operación es un parámetro importante para el diseño de pavimento flexible, ya que influye directamente en la respuesta de la rigidez de las capas de concreto asfáltico en la estructura del pavimento. A medida que el tráfico se mueve a lo largo de la carretera, un gran número de rápidos pulsos de tensión se aplican a cada elemento de los materiales dentro del sistema de pavimento. Por lo general, estos pulsos de tensión duran sólo un período corto de tiempo, y la magnitud y duración dependerá de la velocidad del vehículo, el tipo, la geometría de la estructura del pavimento y la ubicación del elemento en cuestión. La Figura 3.7 muestra una típica estructura de pavimento y la distribución de tensiones en función de la rigidez de la capa. Capas rígidas tienden a extender las tensiones en un área más amplia. Teniendo en cuenta dos puntos elementales A y B en la capa de asfalto, la carga aplicada influye en el punto A, mientras que el punto B se encuentra fuera de la zona de influencia. A medida que la carga se mueve al lado derecho, la tensión en el punto A se incrementará y alcanzará

un valor máximo cuando la carga está directamente encima del punto A y disminuirá a medida que la carga se aleja del punto A.

**Figura 3.7. Distribución de esfuerzos bajo una carga de rueda**

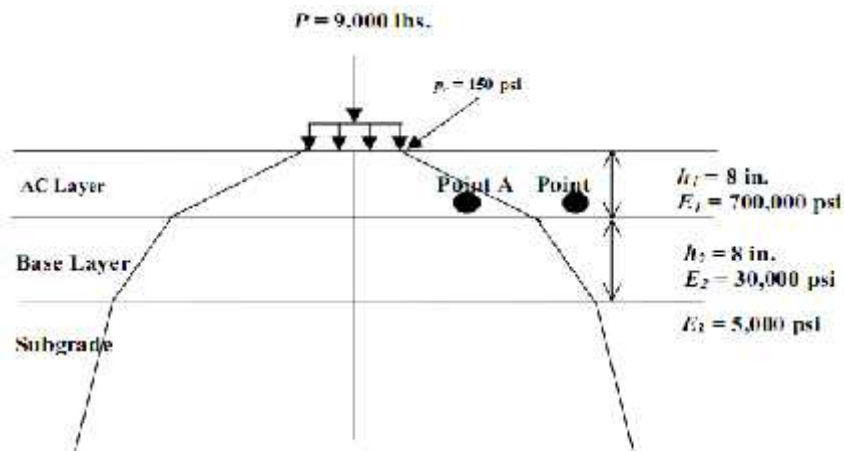


Figura 3.3.6. Stress distribution under wheel load.

Fuente: AASHTO 2008

En la tabla 3.25 se presentan algunas recomendaciones sobre la velocidad típica de operación de vehículos por tipo de servicio del camino.

**Tabla 3.25.- Recomendaciones para la selección de la velocidad de funcionamiento del vehículo.**

Tipo de servicio del camino	Velocidad operacional (mph)	Frecuencia estimada a la profundidad media de capa - profundidad (hz)		
		Capa representante de HMA (4 – 12 in)	Capa delgada de HMA usada en la superficie (1 – 3 in)	Capa fina de HMA Brinder / Base (3 – 12 in)
Interestatal	60	15 – 40	45 – 95	10 -25
Primarias	45	10 – 30	35 – 70	15 – 20
Urbanas	15	5 – 10	10 – 25	5 – 10
Intersecciones	0.5	0.1 – 0.5	0.5 – 1.0	0.1 – 0.25

Fuente: AASHTO 2008

- **Ajuste de volumen de tráfico**
- **Los factores de ajuste mensual.-** Los factores de distribución mensual se utilizan para determinar la variación mensual de tráfico de camiones en el año base. Estos valores son simplemente la relación entre el tráfico de camiones mensuales a la TPDA. Naturalmente, el promedio de la proporción de los 12 meses del año base debe ser igual a 1,0. Si no se dispone de información, asumir una distribución uniforme (es decir, 1,0 para todos los meses para todos los tipos de vehículos).
  - Para los datos de tráfico (24 horas de su recolección continua de datos), se debe determinar el total del número de camiones (en una clase determinada) para cada clase en un período de 24 horas.
  - Utilizar datos representativos de todos los días recogidos en los diferentes meses dentro de un año, para determinar el promedio de tráfico diario de camiones por cada mes del año.
  - Resumiendo el MAF es el tráfico medio de camiones al día para cada mes durante todo el año.
  - Se calcula los factores de ajuste mensual dividiendo el promedio de tráfico diario de camiones de cada mes sumando el promedio de tráfico diario de camiones por cada mes durante todo el año y multiplicando por 12, como se indica a continuación:

$$MAI_i = \frac{AMDTT_i}{\sum_{i=1}^{12} AMDTT_i} * 12 \quad \text{Ec. (3.19)}$$

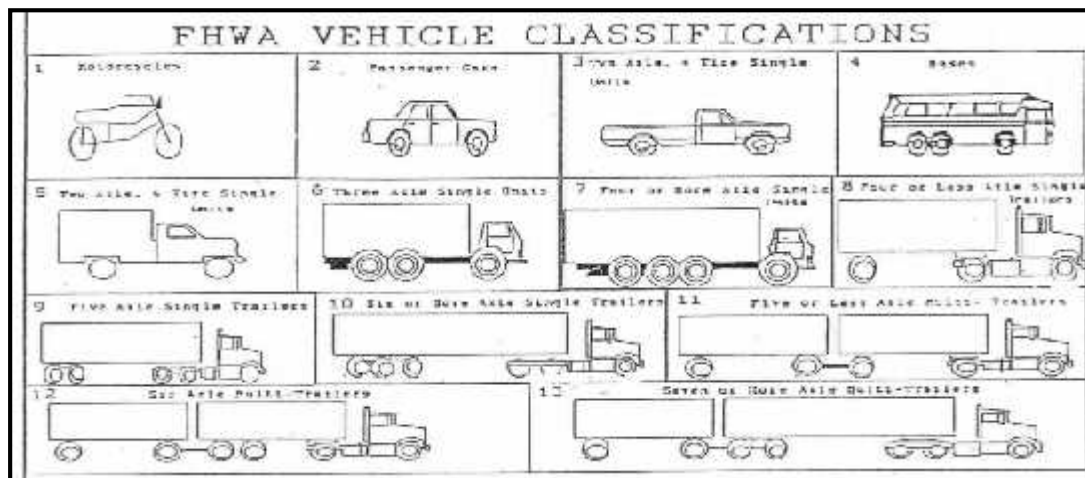
Dónde: **MAFi**: Factor de ajuste mensual en el mes “i”

**MADTTi**: Promedio mensual de tráfico de camiones diarios para el mes i

- **Distribución de vehículos por clase.-** La distribución de vehículos por clase representa el porcentaje de cada clase de vehículo (clases de 4 a 13) en el TPDA para el año base. La suma de los porcentajes TPDA de todas las clases de camión debe ser igual a 100. Es importante tener en cuenta que en el sitio específico (nivel

1) o los datos regionales (nivel 2) no existen datos disponibles; la clasificación de tráfico de camiones (TTC) se puede utilizar en conjunción con la clase funcional de la carretera para estimar la distribución de clases de vehículos. Cada TTC representa un flujo de tráfico con características de tráfico de camiones, y un vehículo de distribución de la clase por defecto se estableció para cada TTC con una base de datos de tráfico nacional para su uso en el nivel 3. Valores por defecto de factores de distribución de vehículos por clase (nivel 3) medidos por los datos de tráfico son LTPP, es decir se proporciona como parte de la Guía de software de diseño. El valor por defecto de distribución de vehículos por clase es elegido en base a la clase de carretera y la mejor combinación del tráfico de camiones, la clasificación (TTC) describe el flujo de tráfico que se espera en el camino dado. Los valores por defecto se obtuvieron mediante la elección de un clase funcional y la combinación de grupos de TTC (es decir, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 11 y 13) que mejor caracteriza el flujo de tráfico que se espera. Un conjunto estandarizado de los grupos que mejor describe TTC del flujo de tráfico para las clases funcionales diferentes se presentan en la tabla 3.26 Cada grupo TTC representa un flujo de tráfico con características únicas del tráfico de camiones (véase tabla 3.27).

**Figura 3.8.- Clasificación de vehículos**



Fuente: AASHTO 2008

**Tabla 3.26.- Clasificación del tráfico de camiones (TTC), descripción de grupo y correspondiente distribución de vehículo (camión) por clase, valores por defecto (porcentaje) considerados en el software de la guía de diseño**

TTC Grupo	TTC Descripción	Distribución de vehículo por clase (%)									
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Mayoría de camiones de un solo remolque en ruta (Tipo I)	1.3	8.5	2.8	0.3	7.6	74	1.2	3.4	1	0.3
2	Mayoría de camiones de un solo remolque en ruta (Tipo II)	2.4	14.1	4.5	0.7	7.9	66.3	1.4	2.2	0	0.2
3	Mayoría de camiones de uno o más remolques en ruta (Tipo I)	0.9	11.6	3.6	0.2	6.7	62	4.8	2.6	1	6.2
4	Mayoría de camiones de un solo remolque en ruta (Tipo III)	2.4	22.7	5.7	1.4	8.1	55.5	1.7	2.2	0	0.4
5	Mayoría de camiones de uno o más remolques en ruta (Tipo II)	0.9	14.2	3.5	0.6	6.9	54	5	2.7	1	11
6	Camiones pequeños o intermedia de un solo remolque en ruta (I)	2.8	31	7.3	0.8	9.3	44.8	2.3	1	0	0.3
7	Mayoría de camiones mixtos en ruta (Tipo I)	1	23.8	4.2	0.5	10.2	42.2	5.8	2.6	1	8.4
8	Mayoría de camiones con varios remolques en ruta (Tipo I)	1.7	19.3	4.6	0.9	6.7	44.8	6	2.6	2	11.8
9	Camiones pequeños o intermedia de un solo remolque en ruta (II)	2.8	34	12	1.6	9.9	36.2	1	1.8	0	0.3
10	Mayoría de camiones mixtos en ruta (Tipo II)	0.8	30.8	6.9	0.1	7.8	37.5	3.7	1.2	5	6.7
11	Grandes camiones con varios remolque en ruta (Tipo II)	1.8	24.6	7.6	0.5	5	31.3	9.8	0.8	3	15.3
12	Camiones pequeños o intermedia de un solo remolque en ruta (III)	3.9	40.8	12	1.5	12.2	25	2.7	0.6	0	1.3
13	Mayoría de camiones mixtos en ruta (Tipo III)	0.8	33.6	6.2	0.1	7.9	26	11	1.4	3	10.3
14	Mayoría de camiones livianos en ruta (Tipo I)	2.9	56.9	10	3.7	9.2	15.3	0.6	0.3	0	0.3
15	Mayoría de camiones livianos en ruta (Tipo II)	1.8	56.5	8.5	1.8	6.2	14.1	5.4	0	0	5.7
16	Mayoría de camiones livianos con varios remolques en ruta	1.3	48.4	11	1.9	6.7	13.4	4.3	0.5	0	12.6
17	Ruta de buses	36	14.6	13	0.5	14.6	17.8	0.5	0.8	0	1.5

Fuente: AASHTO 2008

**Tabla 3.27.- Orientaciones propuestas para la selección de los grupos apropiados (TTC) para las diferentes clasificaciones funcionales de la carretera.**

Descripciones de la clasificación funcional de la carretera	Tráfico de camiones aplicable según su clasificación por número de grupo
Arterias principales - Rutas interestatales y de defensa	1,2,3,4,5,8,11,13
Arterias principales - Rutas dentro del estado, incluyendo autopistas y vías rápidas	1,2,3,4,6,7,8,9,10,11,12,14,16
Arterias menores	4,6,8,9,10,11,12,15,16,17
Colectores principales	6,9,12,14,15,17
Colectores menores	9,12,14,17
Rutas locales y calles	9,12,14,17

Fuente: AASHTO 2008

**Tabla 3.28.- Definiciones y descripciones de los grupos de TTC.**

Buses en flujo de tráfico	Los productos básicos transportados por tipo de camión		TTC Grupo N°.
	Multi – Remolques	Un solo Remolque y unidades simples	
Bajo a ninguno (<2%)	Cantidad relativamente alta de camiones multi - remolque (>10%)	Predominio de camiones con un solo remolque	5
		Alto porcentaje de camiones con un solo remolque , pero algunos camiones sin remolque	8
		El tráfico de camiones se mezcla con un porcentaje más alto de camiones con un solo remolque.	11
		El tráfico de camiones se mezcla con unos porcentajes iguales de camiones solos y camiones con un solo remolque.	13
	Moderada cantidad de camiones multi - remolque (2-10%)	Predominio de camiones solos	16
		Predominio de camiones con un solo remolque.	3
		El tráfico de camiones se mezcla con un porcentaje más alto de camiones con un solo remolque.	7
		El tráfico de camiones se mezcla con unos porcentajes iguales de camiones solos y camiones de un solo remolque.	10
De baja a moderada (>2%)	Bajo a ninguno (<2%)	Predominio de camiones con un solo remolque	1
		Predominio de camiones con un solo remolque, pero con un bajo porcentaje de camiones solos	2

		Predominio de camiones con un solo remolque con una baja a moderada cantidad de camiones solos	4
		El tráfico de camiones se mezcla con un porcentaje más alto de camiones con un solo remolque.	6
		El tráfico de camiones se mezcla con unos porcentajes iguales de camiones solos y de camiones con un solo remolque.	9
		El tráfico de camiones se mezcla con un mayor porcentaje de camiones solos	12
		Predominio de camiones solos	14
Ruta principal de buses (>25%)	Bajo a ninguno (<2%)	El tráfico de camiones se mezcla con igualdad de camiones solos y de camiones con un solo remolque	17

Fuente: AASHTO 2008

Los diseñadores deben escoger el conjunto predeterminado de clase de distribución de vehículos para el TTC que más describe el flujo de tráfico. Hay que señalar que los datos de tráfico en el lugar, regionales o en todo el estado debe empezar años antes del inicio del diseño para asegurar que una cantidad adecuada de los datos es utilizadas en el análisis. Esto tal vez es poco práctico, por lo que para muchos proyectos, una agencia puede optar por utilizar una combinación de datos en concreto y regionales del sitio para reducir el tiempo necesario para recoger los datos necesarios. El diseño de software permite a los diseñadores introducir directamente en la clasificación de vehículos los factores de distribución (niveles 1 a 3) o la importación de un archivo ya preparado para el nivel 3.

- **Distribución de tráfico de camiones por hora.-** Los factores de distribución horaria (HDF) representan el porcentaje de la TPD dentro de cada hora del día. Las entradas en los diferentes niveles son los siguientes:
  - Nivel 1 - un sitio-o distribución específica de determinado segmento de AVC, WIM, o un vehículo datos de recuento.
  - Nivel 2 - a / a nivel estatal la distribución regional determina a partir de AVC, WIM, o el recuento de vehículos de datos.
  - Nivel 3 - los factores que determina a partir de una base de datos nacional o la experiencia local

Para el Nivel 1 a 3 entradas, HDF puede ser calculado usando los datos de tráfico de camiones medido ininterrumpidamente durante un período de 24 horas de tiempo. Los datos horarios se utilizan para determinar el porcentaje del total de camiones dentro de cada hora de la siguiente manera:

- Revisar los datos de AVC y excluir todas las muestras de tránsito con más o menos de 24 horas de datos.
- Determinar el número total de camiones que pasan dentro de cada hora de las 24 horas del tráfico de la muestra.
- Dividir el número total de camiones que pasan dentro de cada hora por el número total de camiones que pasan durante las 24 horas de toda la muestra y multiplicar por 100.

La suma del porcentaje diario de tráfico de camiones por incremento de tiempo debe sumar el 100 por ciento. El valor predeterminado HDF se proporciona en la Guía de software de diseño calculado a partir del tráfico LTPP base de datos y se recomienda como nivel 3. En la tabla 3.29 se muestra un resumen de valores HDF en el software de la guía de diseño.

**Tabla 3.29.- Valores por defecto de la distribución del tráfico de camiones por hora basados en datos de tráfico LTPP.**

Periodo de tiempo	Distribución %	Periodo de tiempo	Distribución %
12:00 a.m. - 1:00 a.m.	2.3	12:00 p.m. - 1:00 p.m.	5.9
1:00 a.m. - 2:00 a.m.	2.3	1:00 p.m. - 2:00 p.m.	5.9
2:00 a.m. - 3:00 a.m.	2.3	2:00 p.m. - 3:00 p.m.	5.9
3:00 a.m. - 4:00 a.m.	2.3	3:00 p.m. - 4:00 p.m.	5.9
4:00 a.m. - 5:00 a.m.	2.3	4:00 p.m. - 5:00 p.m.	4.6
5:00 a.m. - 6:00 a.m.	2.3	5:00 p.m. - 6:00 p.m.	4.6
6:00 a.m. - 7:00 a.m.	5	6:00 p.m. - 7:00 p.m.	4.6
7:00 a.m. - 8:00 a.m.	5	7:00 p.m. - 8:00 p.m.	4.6
8:00 a.m. - 9:00 a.m.	5	8:00 p.m. - 9:00 p.m.	3.1
9:00 a.m. - 10:00 a.m.	5	9:00 p.m. - 10:00 p.m.	3.1
10:00 a.m. - 11:00 a.m.	5.9	10:00 p.m. - 11:00 p.m.	3.1
11:00 a.m. - 12:00 p.m.	5.9	11:00 p.m. - 12:00 a.m.	3.1

Fuente: AASHTO 2008

- **Factores de crecimiento del tráfico.-** La función de crecimiento del tráfico permite el crecimiento o la decadencia en el tráfico de camiones a través del tiempo (previsión de tráfico de camiones o retrospectiva). Tres funciones están disponibles para estimar en el futuro los volúmenes de tráfico de camiones:
  - No hay crecimiento.
  - Crecimiento lineal.
  - Crecimiento compuesto

Diferentes funciones de crecimiento pueden ser utilizados para diferentes clases funcionales. Sobre la base de la función elegida, la fecha de apertura de la carretera al tráfico (excluida la construcción), y la vida de diseño (que se examinan en la categoría básica de entrada de información), el tráfico se proyecta hacia el futuro.

- **Factores de distribución de carga por eje.-** Los factores de distribución de carga por eje, simplemente representan el porcentaje de total de aplicaciones del eje dentro de cada intervalo de carga para un tipo específico de eje y clase de vehículo (clases de 4 a 13). Estos datos deben ser proporcionados por cada mes para cada clase de vehículo. La definición de los intervalos de carga para cada tipo de eje se proporciona a continuación:
  - Ejes Individual - 3.000 libras a 41.000 libras a 1.000 libras intervalos.
  - Ejes tándem - 6.000 libras a 82.000 libras a 2.000 libras intervalos.
  - Trídem y ejes Quad - £ 12.000 a £ 102.000 en 3000 intervalos de libras.

La distribución de la carga por eje o espectros normalizados sólo se puede determinar a partir de datos WIM. Por lo tanto, el nivel de entrada depende de la fuente de datos (sitio, regional o nacional) para este procedimiento de diseño, los espectros de carga se han normalizado sobre una base anual.

- **Entradas Generales de Tráfico.-** La mayoría de las entradas en esta categoría se define con la configuración de carga por eje y detalles de carga para el cálculo de las respuestas del pavimento. Las excepciones son el "número de tipos de ejes de camiones

por clase" y "distancia entre ejes" de los insumos que se utilizan en los cálculos de tráfico.

➤ **Distancia media de la rueda.**- Es la distancia desde el borde exterior de la rueda a la marca en el pavimento. Este aporte es muy importante en la informática, tanto para daños por fatiga y grietas JPCP predicciones CRCP pero no se utiliza para el análisis de pavimento flexible. Existen tres tipos de niveles de datos:

- Nivel 1 - el valor determinado a través de mediciones directas en el sitio específico de segmentos (no aplicable a los nuevos alineamientos).
- Nivel 2 - un valor promedio de la región / estado determina a partir de mediciones en caminos con características de tráfico similares y las condiciones del sitio (por ejemplo, la clase funcional, tipo de pavimento, nivel de servicio y así sucesivamente).
- Nivel 3 - El valor promedio nacional o estimaciones basadas en la experiencia local.

Un dato por defecto (Nivel 3) la distancia media de la rueda es 18 pulgadas y se ofrece en el software, esto es recomendable si la información más exacta no está disponible.

➤ **Desviación estándar del paso del tráfico.**- Influye en el número de aplicaciones de carga por eje en un punto de partida para la predicción de la falla y el rendimiento; este parámetro afecta a la predicción de la fatiga y la deformación permanente en el sistema de pavimento. A pesar de que afecta directamente a la progresión del daño por fatiga y ahuellamiento, un enfoque ligeramente diferente se utiliza para cada peligro. Estimación de daños por fatiga se basa en la Ley de Miner, que establece que el daño está dado por la siguiente relación:

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i} \quad \text{Ec. (3.20)}$$

Dónde:      **D:** daño.

**T:** número total de períodos.

**ni:** tráfico real para el período i

**Ni:** el tráfico permitido en las condiciones imperantes en el periodo i.

Los diferentes niveles para el tráfico son: Nivel 1, nivel 2, nivel 3 ya mencionados anteriormente. Un dato por defecto (Nivel 3) significa que el tráfico de camiones deambula por la desviación estándar de 10 pulgadas; esto se ofrece en la Guía de diseño de software.

- **Diseño ancho del carril.**- Esta es la distancia entre las marcas de los carriles a cada lado del carril de diseño. Se utiliza principalmente para el diseño de pavimento rígido y tiene poco efecto en los análisis de pavimento flexible; el valor por defecto para los carriles de ancho estándar es de 12 pies.
- **Número de tipos de eje por clase de camiones.**- Esta entrada representa el número medio de ejes para cada clase de vehículo (clase 4 a 13) para cada tipo de ejes (tándem único, trídem y quad). Los diferentes niveles de datos son:
  - Nivel 1 - los valores determinados por el análisis directo de los datos de tráfico del sitio-específico (AVC, WIM, o una densidad de tráfico).
  - Nivel 2 - los valores determinados por el análisis directo de los datos de tráfico regional / estatal (AVC, WIM, o una densidad de tráfico).
  - Nivel 3 - los valores por defecto basados en el análisis de bases de datos nacionales, tales como las bases de datos LTPP.

El dato por defecto (Nivel 3) de las estimaciones del número de tipos de eje por clase de camiones previsto en la Guía de diseño de software y se estima a partir de datos LTPP se presentan en la tabla 3.30.

**Tabla 3.30.- Sugiere valores por defecto para el número promedio de ejes simples o tándem, y los ejes trídem por clase de camión.**

Clasificación de camiones	Número de ejes simples por camión	Número de ejes tándem por camión	Número de ejes trídem por camión	Número de ejes quad por camión
4	1.62	0.39	0	0
5	2	0	0	0
6	1.02	0.99	0	0
7	1	0.26	0.83	0
8	2.38	0.67	0	0
9	1.13	1.93	0	0
10	1.19	1.09	0.89	0
11	4.29	0.26	0.06	0
12	3.52	1.14	0.06	0
13	2.15	2.13	0.35	0

Fuente: AASHTO 2008

Nota: El número de ejes de quad por camión es de 0,00, porque había muy pocos contados en la base de datos de tráfico LTPP.

**Configuración del eje.-** Una serie de datos son necesarios para describir los detalles de la carga de los neumáticos y el eje para su uso en el módulo de la respuesta del pavimento. Los valores típicos son para cada uno de los siguientes elementos; sin embargo, los valores del sitio específico pueden ser utilizados, si la información está disponible.

- Ancho de eje promedio - la distancia entre dos bordes exteriores de un eje. Para camiones se puede suponer 8,5 pies para el ancho del eje.
- Separación de los neumáticos dobles - la distancia entre los centros de un neumático dual. El espacio de neumáticos dual para los camiones es de 12 pulgadas.
- Presión de los Neumáticos - la presión de inflado en caliente o la presión de contacto de un neumático o una llanta dual. Para los camiones pesados, la presión típica de inflación en caliente es de 120 psi.

- Separación de los ejes - la distancia entre los ejes consecutivos de un tándem, trídem o quad. La distancia media entre ejes es de 51,6 pulgadas tándem y de 49,2 pulgadas en el trídem.
- **Distancia entre ejes.-** Esta información es utilizada principalmente para el diseño de pavimento rígido y tiene poco efecto sobre el análisis de pavimento flexible. Una serie de datos son necesarios para describir la distancia entre ejes de los vehículos para su uso en las respuestas del pavimento en computación. Estos datos pueden ser obtenidos directamente de las bases de datos del fabricante o medidos directamente en el campo.

La distancia entre ejes media (metros) - a corto, mediano o largo plazo. Los valores recomendados son 12, 15 y 18 pies de distancia entre ejes de corto, mediano y largo plazo, respectivamente.

El porcentaje de los camiones en la clase de 8 a 13 con la distancia entre ejes de corto, mediano y largo plazo - una distribución uniforme del uso (por ejemplo, 33, 33 y 34 por ciento para los ejes corto, mediano y largo plazo, respectivamente), a menos que una información más exacta esté disponible.

- **Procesamiento de entrada.-** Las entradas de tráfico son procesadas para producir la siguiente "entrada de procesado" para cada mes durante el período completo de diseño:
- Número de ejes individuales en cada categoría de carga.
  - Número de ejes tandem en cada categoría de carga.
  - Número de ejes trídem en cada categoría de carga.
  - Número de ejes quad en cada categoría de carga.
  - Número de camiones (Clase 8 y arriba) en cada categoría de carga (para el agrietamiento).

Los factores de distribución de tráfico por hora se aplican a la entrada de tráfico procesado (la densidad de tráfico por tipo de eje para cada mes del período de diseño) para obtener tráfico por hora en el momento del cálculo de daño para cada peligro.

#### **3.5.1.2.5.- Clima**

Las condiciones ambientales tienen un efecto significativo sobre el desempeño de pavimentos flexibles. La interacción de los factores climáticos con los materiales del pavimento y la carga es compleja. Factores tales como la precipitación, temperatura, ciclos hielo-deshielo, y la profundidad de agua afectan a la temperatura del pavimento, el subsuelo y el contenido de humedad, lo que, a su vez, afecta directamente la capacidad de carga de las capas y el rendimiento final del pavimento.

➤ **Entradas climáticas.-** La información relacionada con el clima requiere lo siguiente para realizar el diseño de pavimento flexible:

- La temperatura del aire cada hora durante el período de diseño.
- Precipitación por hora durante el período de diseño.
- Velocidad del viento por horas durante el período de diseño.
- Porcentaje de luz solar cada hora durante el período de diseño.
- Valores a cada hora de humedad relativa ambiental.
- El agua estacional o permanente en el sitio del proyecto.

Tener en cuenta que al menos 24 meses de los datos de la estación meteorológica son necesarios para que el software de la guía de diseño pueda dar una solución razonable.

➤ **Procesamiento de entrada.-** Las entradas climáticas se combinan con las propiedades del material de pavimento, espesores de capa, y el drenaje; la siguiente información se utiliza en el análisis de diseño del pavimento flexible:

- Perfiles de distribución de temperatura por hora a través de las capas de asfalto.

- Perfiles de cada hora de temperatura y humedad (incluyendo los cálculos de la profundidad de heladas) a través de capas de otros pavimentos.
- Informe mensual o bimensual (durante los períodos de congelados o recientemente) de las predicciones de capa de módulos para la base de asfalto no consolidada, / sub-base, y las capas de sub-base.
- Los valores de índice de congelación anual.
- El promedio anual de días de lluvia.
- Número de ciclos de congelación y descongelación.

#### **3.5.1.2.6.- Estructura del pavimento**

Los valores de entrada para las propiedades de la estructura de pavimento se organizan en las siguientes categorías:

- Drenaje y características de la superficie.
- Las propiedades de capa.
- La posible falla.

#### **Drenaje y características de la superficie.**

Estas son las propiedades generales de estructura de pavimento para el diseño, y la información requerida en esta categoría incluye lo siguiente:

- Capa superficial de onda corta del pavimento y su capacidad de absorción.
- El potencial de infiltración.
- Pendiente del pavimento.
- Longitud de la vía de drenaje.

**Absorción de onda corta del pavimento.-** La capacidad de absorción de onda corta de una superficie de pavimento depende de la composición del pavimento, el color y textura. La capacidad de absorción de onda corta es la relación entre la cantidad de energía solar absorbida por la superficie del pavimento y la energía total que fue

expuesta a la superficie, lo que naturalmente afecta el régimen de temperatura dentro de la estructura del pavimento y a la respuesta estructural asociada. Esta entrada va de 0 a 1. En general, mientras más ligero y más reflexiva es la superficie, menor es la capacidad de absorción de onda corta. Para el Nivel 1 de entrada, este valor debe ser determinado a través de pruebas directas. El rango de valores típicos de 0,8 a 0,9 para el curtido de asfalto y de 0,9 a 0,98 para el asfalto fresco. El valor por defecto recomendado es de 0,85 para el diseño de un pavimento nuevo.

**Infiltración.**- Esta entrada cuantifica la cantidad de agua que se infiltra en la estructura del pavimento, la calibración de los modelos de falla del pavimento flexible supone que no se produce la infiltración de la humedad durante el período de diseño. Así, el procedimiento de diseño de pavimento flexible no permite al diseñador elegir cualquier nivel de infiltración en este momento.

**Las propiedades de capa.**- El procedimiento de diseño de pavimento flexible permite una gran variedad de asfalto, base, propiedades de material sub-base y espesores de capa. Por ejemplo, una estructura de pavimento flexible podría consistir en una o más capas de la superficie de concreto asfáltico, una base de asfalto tratado, una sub-base agregada, sub-base compactada, la subrasante natural y la base. La estructura del pavimento original definida por el usuario por lo general tiene de 4 a 6 capas. Sin embargo, el software de la guía de diseño podrá subdividir la estructura del pavimento en 12 a 15 subcapas para el modelado de la temperatura y las variaciones de la humedad. El software de la guía de diseño realiza las subcapas internamente en función del tipo de material, espesor de la capa y la ubicación de la capa dentro de la estructura del pavimento. El software de la guía de diseño puede analizar un máximo de 19 capas. Sin embargo, debido a las subcapas automáticas de ciertas capas, se recomienda un máximo de 10 capas.

Las siguientes restricciones se deben satisfacer como mínimo:

- La capa superficial en el diseño de pavimento flexible es siempre una capa de concreto asfáltico.

- Asfalto de gran profundidad (concreto asfáltico en la subrasante) es la estructura mínima que puede ser analizada.
- Sólo una capa granular se puede colocar entre dos capas estabilizadas; las dos últimas capas de la estructura del pavimento deben ser capas consolidadas.

### **Entradas generales de propiedades de capa**

- Espesor de capa.
- Relación de Poisson
- La conductividad térmica - la cantidad de calor que fluye normalmente a través de una superficie de unidad de área por unidad de tiempo del gradiente de temperatura normal a la superficie. El valor típico para el asfalto-estabilizado, material base es de 0,67 BTU/hr-ft- ° F.
- Capacidad de calor - el calor necesario para elevar la temperatura de una unidad de masa de material de una unidad de temperatura. Un valor típico para el asfalto, base estabilizada es 0,23 BTU/lb- ° F.
- Unidad de peso total - rango típico de alta densidad graduada en caliente de asfalto de mezcla es 134 a 148 lb/ft<sup>3</sup> (PCF).

**Capas químicamente estabilizadas.-** Los siguientes datos son necesarios para definir una capa químicamente estabilizada:

- Módulo de diseño resiliente máximo de diseño.
- Módulo resiliente mínimo (después de daño por fatiga completamente propagada en la capa).
- Módulo de ruptura.
- Unidad de peso del material.
- Relación de Poisson.
- La conductividad térmica - la cantidad de calor que fluye normalmente a través de una superficie de unidad de área por unidad de tiempo del

gradiente de temperatura normal a la superficie. El valor típico para la base química o químicamente estabilizada es de 1,0 BTU/hr-ft- ° F.

- Capacidad de calor - el calor necesario para elevar la temperatura de una unidad de masa de material de una unidad de temperatura. Un valor típico para la base es químicamente estabilizada 0,28 BTU/lb- ° F.

**Sin consolidar la base / sub-base / subrasante.-** Las capas base sin consolidar de espesor superior a 6 en la sub-base y la capa más gruesa no consolidada en ocho pulgadas se divide en subcapas internamente dentro del software de la Guía para su análisis. Para la capa base (capa consolidados primero), la primera sub-capa de 2 pulgadas es siempre el espesor remanente de la capa de base y las capas sub-base que son sub-capas se dividen en sub-capas con un espesor mínimo de 4 pulgadas para compactar sub-bases naturales; el mínimo espesor de la subcapa es 12 pulgadas en una estructura de pavimento de sub-capas sólo a una profundidad de 8 pies. Cualquier resto de sub-base se considera como una capa infinita. Si el lecho de roca está presente, la subrasante restante es tratada como una capa más allá de 8 pies, la roca no es sub-nivel y siempre se trata como una capa infinita.

Los principales insumos requeridos para la base / sub-base no consolidada y las capas de sub-base son:

- Espesor de capa (sólo para capas de base y sub-base) - para capas de sub-base con cal estabilizada (no modificada) o subsuelos compactados deben tenerse en cuenta por separado la sub-base natural, que puede definirse como una capa estructural.
- Módulo resiliente de capa.- Para el Nivel 1 de entrada - especificar el esfuerzo no lineal dependiente del módulo resiliente de parámetros K1, K2 y K3. Cabe señalar que las entradas de nivel 1 exigen el uso del código de elementos finitos no lineales para la predicción de rendimiento; en la actualidad sólo se recomienda para ser usado con fines de investigación y análisis.

Para el nivel 2 - el valor del módulo resiliente elástico lineal directo, como alternativa, del valor del módulo elástico se puede determinar a partir de relaciones empíricas en términos de propiedades de índice.

Para el nivel 3 de entrada - especificar un módulo por defecto resistente en función de la AASHTO o clasificación unificada de suelos.

- Relación de Poisson.
- Coeficiente de presión lateral de tierra,  $K_o$  - un valor típico para esta entrada es de 0,5 para materiales naturales o no compactados.

**Análisis de la temporada.**- El diseñador tiene la opción de incluir o no incluir el análisis de la temporada para materiales no consolidados, base y el suelo. Las siguientes opciones están disponibles para la temporada de análisis para los niveles 1 y 2 de entradas de materiales no consolidados:

1. Introducir un módulo resiliente ( $M_r$ ) de diseño representativo en la humedad óptima contenida (ya sea  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  de entrada del nivel 1 o el  $M_r$  de los niveles 2 y 3) o de otro tipo de parámetros permitidos del suelo fuerza / rigidez (CBR, el valor-R, AASHTO estructurales coeficiente de capa) y utilizar el módulo de EICM incrustado en el Guía de diseño de software para estimar las variaciones estacionales basados en el cambio, la humedad y los perfiles de temperatura a través de la estructura del pavimento. Los otros insumos para EICM incluyen el índice de plasticidad, el porcentaje que pasa los tamices N ° 4 y N ° 200, y el tamaño de grano efectivo correspondiente al pasar del 60 por ciento en peso (D60) de la capa en cuestión. El uso de estos insumos, EICM estima la unidad de peso, la densidad de sólidos, la conductividad hidráulica saturada de la capa de pavimento, el contenido óptimo de humedad gravimétrica, grado de saturación de la capa, y el agua en el suelo, parámetros de la curva característica. Estas cantidades calculadas pueden ser sustituidas con entradas directas.

2. En lugar de usar la EICM, los módulos de temporada (ya sea  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  para el nivel 1 de entrada o el  $M_r$  de los niveles 2 y 3), CBR, el valor R, u otros valores

pueden introducirse directamente. Para la entrada directa, 12 meses de laboratorio estimado para valores de  $M_r$  (o de otro tipo pruebas admisibles del suelo) son obligatorios.

3. La variación estacional de la rigidez de los materiales no consolidados puede ser ignorada. En este caso, un valor de diseño de módulo representante (o el valor de prueba de otro tipo) es necesaria.

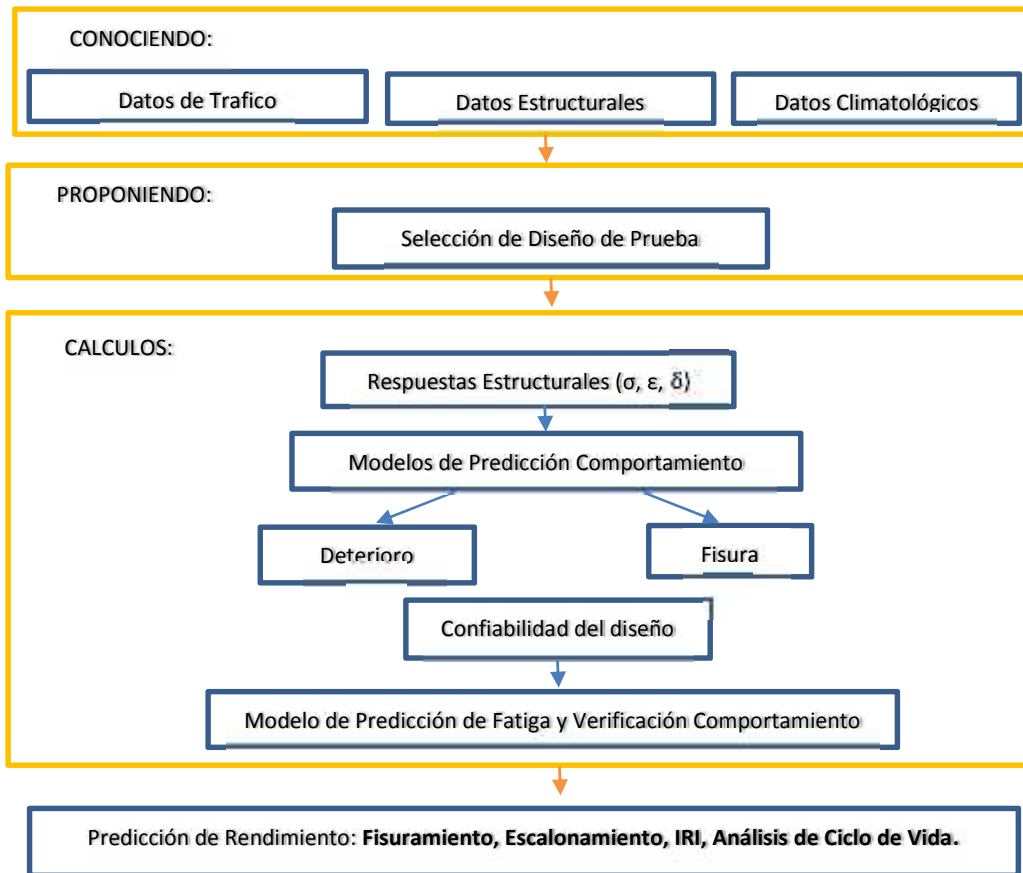
**Roca de fondo.-** La presencia de roca dentro de 10 pies de la superficie del pavimento influye en la estructura de respuesta de las capas de pavimento. Las entradas para esta capa son las siguientes:

- Espesor de la capa (infinito si se trata de la última capa).
- Peso de la unidad.
- El coeficiente de Poisson.
- Módulo de capa.

**La posible falla.-** Estas propiedades adicionales son necesarias para los modelos de predicción de rugosidad (IRI). Las dos propiedades que se requieren son:

- Grietas en bloque, que se define como un porcentaje del área total de carril.
- Sellado, grietas longitudinales fuera del recorrido de la rueda, que se define en términos de pies por milla.

### 3.5.1.3.- Flujograma de Diseño



## CAPITULO IV

### VALORACION DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS ENTRE LOS METODOS

#### 4.1.- Programas a Utilizar

##### 4.1.1.- Métodos Empíricos

##### 4.1.1.1.- DIPAV 2.0

La Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO-93 tanto en el diseño de pavimentos rígidos y flexibles nuevos así como en diseño de sobrecarpetas en pavimentos existentes es todavía la técnica más usada para establecer tipos y espesores de capas de pavimentos de carreteras y vías urbanas. Si bien actualmente se están introduciendo métodos mecanicistas, éstos requieren una importante cantidad de información difícil de obtener, además de la necesaria calibración, que demandará todavía varios años para poder ser implementada.

El programa DIPAV 2.0, desarrollado por el IBCH ha sido mejorado y ampliado para contemplar además del diseño de pavimentos nuevos tanto rígidos como flexibles, el diseño de sobrecarpetas en pavimentos existentes.

El programa contiene las ecuaciones para el cálculo de Ejes Equivalentes, facilitando su cálculo sin necesidad de tablas, también es posible calcular los módulos resilientes y de reacción de la subrasante estacionales.

En la alternativa de pavimento rígido, se consideran el cálculo de espesor de losa, diseño de barras de amarre y reservorio de juntas. En la alternativa de pavimento flexible, el programa calcula el número estructural, con verificación por capas y también permite especificar espesores. En ambos casos se tiene la opción de generar gráficos de sensibilidad a todas las variables de diseño en función al espesor de losa o número estructural del asfalto.

En esta nueva versión, para el diseño de sobrecarpetas es posible utilizar datos del deflectómetro de impacto para conocer las propiedades del suelo y de las distintas capas

constitutivas de un pavimento existente, con la finalidad de diseñar los diferentes tipos de sobrecarpetas que se presentan a continuación:

- ✓ Concreto Asfáltico sobre Concreto Asfáltico.
- ✓ Concreto Asfáltico sobre Pavimento de Hormigón Previamente Fracturado.
- ✓ Concreto Asfáltico sobre Pavimento de Hormigón.
- ✓ Concreto Asfáltico sobre Pavimento Asfalto/Hormigón.
- ✓ Pavimento de Hormigón adherido a Pavimento de Hormigón.
- ✓ Pavimento de Hormigón no adherido a Pavimento de Hormigón.
- ✓ Pavimento de Hormigón sobre Concreto Asfáltico.

#### **4.1.2.- Métodos Mecanicistas**

##### **4.1.2.1.- BS PCA**

Teniendo en cuenta el auge que se ha dado en los últimos años en la construcción y diseño de pavimentos rígidos en vías urbanas y de la red vial nacional, y también considerando la amplia utilización a nivel nacional del método de diseño de pavimentos rígidos de la Portland Cement Association versión de 1984 (PCA 1984), la Universidad del Cauca dentro de su programa de Maestría en Ingeniería Terrestres del Instituto de Posgrado en Ingeniería Civil consideró conveniente desarrollar un Software que permita dimensionar los espesores de la estructura de pavimentos rígido y a la vez permita sensibilizar la incidencia de los diferentes parámetros en el dimensionamiento del pavimento.

El programa llamado BSPCA realizado en Visual Basic requiere la introducción de los diferentes parámetros y efectuando los análisis de fatiga y erosión permite obtener el dimensionamiento de la estructura de pavimento. Una vez realizado el dimensionamiento permite realizar un análisis de sensibilidad para evaluar la incidencia de la variación de los respectivos parámetros en el análisis de los dos criterios de diseño fatiga y erosión son contemplados por el método.

Esta herramienta se considera de gran utilidad para los ingenieros de pavimentos debido a que facilita la actividad de diseño y permite fácilmente evaluar los cambios que se pueden presentar dentro del proceso constructivo cuando alguna de las variables difiera de las consideraciones inicialmente planteadas en el diseño.

#### **4.1.2.2.- KENPAV**

KENPAV es un software desarrollado para trabajar en un ambiente Windows, está desarrollado sobre un plataforma elaborada en Visual Basic, razón por la cual se trató de construir un ambiente lo más amable y sencillo posible facilitando el trabajo de quien vaya a utilizar el programa.

El programa está elaborado para diseñar pavimentos optimizando una capa de la estructura escogida de acuerdo a parámetros antes definidos por el usuario. Una vez finalizado este proceso, presenta la opción de calcular una recalza a la estructura antes diseñada.

Aunque el programa es fácil de manejar, hay que aclarar que la persona que va a hacer uso de él debe tener los conocimientos suficientes sobre el tema para entender los resultados y las sugerencias hechas por este durante su ejecución, además, los datos ingresados deben estar soportados por estudios y ensayos reales de laboratorio que correspondan a las condiciones de la estructura de pavimento cuando esta sea construida; esto con el fin de evitar errores en el dimensionamiento de la estructura que lleve, una vez este construida, a daños inesperados antes de la finalización del periodo de diseño.

#### **4.1.3.- METODOS EMPIRICO-MECANICISTAS**

##### **4.1.3.1.- M-E PDG**

La guía de Diseño de Pavimentos Mecánico-Empírico (MEPDG) es actualmente la herramienta más completa que existe para el análisis y diseño de pavimentos. MEPDG es el resultado de varios años de investigación en los Estados Unidos como parte del proyecto NCHRP 1-37<sup>a</sup> "Development for the 2002 Guide for Design of New and Rehabilitated Pavement Structures". Los manuales y reportes fueron publicados inicialmente en el año

2004, habiendo sido revisados y mejorados antes de ser utilizados con fines prácticos. En el 2008, AASHTO publicó un manual del MEPDG para el uso práctico de este método en el diseño de pavimentos.

Utilizando el MEPDG, las alternativas de las estructuras de pavimento son evaluadas para verificar su desempeño a lo largo de su vida en servicio. Los modelos de comportamiento son basados en las propiedades de los materiales para evaluar la probabilidad de falla. Un nuevo software ha sido desarrollado para asistir con el diseño mecanístico-empírico de pavimentos.

El programa provee herramientas para evaluar el efecto de las condiciones particulares del material en el comportamiento del pavimento, además de brindar un mejor modelaje de los factores que afectan al pavimento: clima, cargas de tráfico, fenómeno de envejecimiento, variación del comportamiento de los materiales y su relación con la vida útil esperada del pavimento.

#### **4.2.- ELEMENTOS DE VALORACION**

Para los elementos de valoración se tomaron en cuenta los pasos más importantes y únicos para el buen funcionamiento de un software o programa, el cual nos facilita y abrevia los cálculos y operaciones. Los identificamos como:

- a. Datos de Entrada
- b. Procesamiento
- c. Resultados

##### **4.2.1.- DATOS DE ENTRADA**

Los datos de entrada son la “materia prima” para el funcionamiento de cualquier software, considerados como la verdadera información que se tratará y procesará. Existen 2 tipos de datos: manuales y automáticos, los manuales son aquellos que se proporcionan en forma directa por el usuario, mientras que los automáticos son datos o información que toma en cuenta directamente de tablas suministradas anteriormente o que provienen de otros módulos.

Un dato dentro de un programa se caracteriza por llevar asociado un identificador, tipo y un valor.

- Identificador: Nombre para referenciar al dato dentro del programa.
- Tipo: Pueden ser numerales o alfabéticos.

Valor: Sera un elemento determinado dentro del rango de valores permitidos por el tipo de dato definido.

#### **4.2.1.1.- Métodos Empíricos**

##### **4.2.1.1.1.- DIPAV 2.0**

A continuación, se presentan las características de los datos de entrada del programa DIPAV 2.0.

Una vez abierto DIPAV 2.0, los menús presentados en la parte superior de la pantalla son: “*Archivo*”; “*Herramientas*”, “*Proyecto*” y “*Ayuda*”. El primero “*Archivo*”, contiene todas las funciones inherentes al manejo de documentos, recuperación; guardado; impresión y cierre del programa. El Menú “*Herramientas*” permite hacer modificaciones en la configuración regional del ordenador. El Menú “*Proyecto*” permite ingresar datos generales de un proyecto o duplicar información de un archivo de diseño cuantas veces se desee. Finalmente el menú “*Ayuda*” contiene un acceso para desplegar ayuda en línea y también información adicional sobre el desarrollo del programa. La pantalla inicial de DIPAV 2.0, se muestra a continuación:



Como observamos en la figura 4.3 tenemos 10 datos de entrada con ventanas blancas las cuales son:

1. **Serviciabilidad Inicial (Po).**- Variable desarrollada en la página 51 del Capítulo 3 del presente trabajo
2. **Serviciabilidad Final (Pt).**- Variable desarrollada en la página 52 del Capítulo 3 del presente trabajo
3. **Módulo de Rotura del H° (S'c).**- Variable desarrollada en la página 53 del Capítulo 3 del presente trabajo
4. **Módulo de Elasticidad del H° (E).**- Variable desarrollada en la página 52 del Capítulo 3 del presente trabajo
5. **Coefficiente de Drenaje (Cd).**- Variable desarrollada en la página 54 del Capítulo 3 del presente trabajo
6. **Coefficiente de Transferencia de Cargas (J).**- Variable desarrollada en la página 53 del Capítulo 3 del presente trabajo
7. **Modulo Efectivo de Reacción de la Subrasante (k).**- Variable desarrollada en la página 49 del Capítulo 3 del presente trabajo

DIPAV 2.0, contiene adicionalmente las fórmulas necesarias para procesar el valor efectivo estacional de “k”, puesto que las condiciones del suelo varían a lo largo del año, dependiendo del contenido de humedad, congelamiento, deshielo y otros factores presentes en diferentes épocas. Es posible dividir los datos en hasta 24 periodos (dos por cada mes), de manera que se considere dentro del cálculo éstas variaciones y por tanto su efecto en el comportamiento del pavimento.

Puesto que normalmente es difícil obtener datos estacionales, es posible realizar ensayos en condiciones representativas de humedad a fin de estimar las condiciones reales de la obra durante determinados períodos de tiempo. También podrían obtenerse datos de deflectometría en pavimentos cercanos en diferentes épocas del año para tener datos más confiables. Finalmente, el valor tradicional de CBR que se realiza en condiciones de saturación podría ser utilizado directamente para correlacionar valores por el lado de la

seguridad.

Para acceder a la pestaña que calcula el Módulo Estacional, simplemente haga clic en el botón “*Calcular*” situado al lado derecho del valor de “k” o haciendo clic en la pestaña “*Módulo*” ubicada en la parte superior del formulario principal,. Se mostrará la siguiente pantalla:

**Figura 4.4. – Cálculo del módulo de reacción de la subrasante**

The screenshot shows the DEPAW 2.0 software interface. The main window is titled 'DEPAW 2.0' and has a menu bar with 'Archivo', 'Herramientas', 'Proyecto', and 'Ayuda'. Below the menu bar is a toolbar with various icons. The main window is divided into several sections:

- Formulario:** A tabbed interface with tabs for 'Inicio', 'Módulo', 'Cálculo', 'Información Adicional', 'Ejecución de Anchos', 'Determinación de Juntas', and 'Configuración'. The 'Módulo' tab is currently selected.
- Tabla:** A table with 24 rows and 4 columns. The columns are labeled 'Estación', 'Reacción', 'Valor k (kPa/mm)', and 'Tiempo de curado (h)'. The rows are numbered 1 through 24.
- Formulario de Entrada:** On the right side of the 'Módulo' tab, there are two input fields:
  - Top field: 'Espesor de la capa proyectada (mm)' with a text input box.
  - Bottom field: 'Módulo Elástico de Reacción de la Subrasante k (kPa/mm)' with a text input box.
- Botones:** Below the input fields are two buttons: 'Calcular' and 'Cancelar'. At the bottom of the window is a 'Salir' button.

La Fig. 4.4 presenta una tabla con hasta 24 posibles valores, dependerá del usuario definir el número de datos que desea utilizar. El primer campo “*Estación*” es de tipo alfanumérico y puede tener cualquier nombre especificado por el usuario, normalmente debería utilizarse un período de tiempo (Ene-Abr; May-Ago; Sep-Dic) o cualquier otro. Internamente cada estación tiene la misma influencia dentro del cálculo, motivo por el cual debe tenerse el cuidado de utilizar estaciones de la misma duración y no necesariamente correspondientes a meses enteros.

Para cada estación se debe establecer su Módulo Resiliente. El Programa utilizará los datos diferentes de cero. Es importante mantener el orden es decir introducir los datos a partir del período 1 y no colocar valores de cero en ninguna casilla. El programa únicamente utilizará los valores introducidos, de manera que no es necesario contar con 24 valores. De este modo, una vez que se presiona el botón “*Calcular*”, DIPAV 2.0 obtendrá el Módulo de Reacción del Terreno Estacional, valor que aparecerá directamente en la pantalla de datos para el diseño de espesor de losa. Si se presiona el botón “*Exportar*”, la planilla de cálculo será exportada a una hoja “Excel” en caso de que se requieran los datos para cálculos adicionales u otro tipo de tratamiento.

El método AASHTO - 97 considera la capa base como una capa estructural y por tanto establece su aporte dentro del método de cálculo. AASHTO-93 permite el incremento de k por aporte de la capa base granular o estabilizada. El cual debe realizarse siempre con precaución para no producir valores de “k” irreales.

El principal requisito para la construcción de un pavimento rígido es que la capa de apoyo sea uniforme, por este motivo debe exigirse una adecuada compactación de la subrasante (al menos 95% del T-180). La baja sensibilidad del diseño del pavimento rígido a esta variable no puede ser un pretexto para no compactar adecuadamente el terreno y la capa base. Se recomienda consultar la bibliografía del IBCH sobre aspectos constructivos.

**8. Confiabilidad (R).**- Variable desarrollada en la página 48 del Capítulo 3 del presente trabajo

**9. Desviación Estándar (So).**- Variable desarrollada en la página 48 del Capítulo 3 del presente trabajo

### **10. Numero de Ejes Equivalentes ESALs**

Para calcular los ESALs con DIPAV 2.0, se debe presionar el botón “*Calcular ESALs*” que se encuentra en la parte inferior derecha de la pestaña principal de diseño de pavimentos o hacer clic en la pestaña “*ESALs*” situada en la parte superior del formulario de diseño al lado de la pestaña “*Módulo*”. De manera previa es necesario definir la serviciabilidad inicial y

final del pavimento, ya que esta última es necesaria para el cálculo.

Al entrar a la pestaña de **Calcular ESALs**, se presentan dos sub pestañas: **Cálculo del TPDA** y **Cálculo de Factores Equivalentes Vehiculares (FC)**.

Antes de realizar cualquier cálculo, en la parte inferior de la sub pestaña **Cálculo del TPDA** se debe dimensionar la tabla para el cálculo de la TPDA, introduciendo en la parte inferior derecha la cantidad de años para los cuales se tiene la información y la cantidad de tipos de vehículos que se tiene para cada año. Se debe hacer clic en el botón **Aceptar** y la tabla quedara dimensionada.

Luego se debe introducir un valor de espesor de losa en pavimento rígido, (o el número estructural en el caso de pavimento flexible). Esto parece un contrasentido ya que justamente este es el valor a determinar, sin embargo, el proceso puede ser iterativo en cuanto a la determinación de ejes equivalente, de manera que se requiere un valor aproximado de inicio a juicio del diseñador a fin de que se pueda determinar los FC y se calculen los ESALs. Una vez determinado el espesor real de la losa (o el número estructural en caso de pavimento flexible), se puede volver a calcular los ESALs ya con el valor correcto de espesor de losa o número estructural. Sin embargo, puesto que los FC no tienen una sensibilidad muy grande a este valor, usualmente esta iteración no proporcionará valores muy diferentes a los inicialmente calculados.

El otro dato requerido en la parte inferior de la sub pestaña **Cálculo del TPDA** es el porcentaje de tráfico que circulará por el carril de diseño. Es importante aclarar que el TPDA (Tráfico Promedio Diario Anual) corresponde al valor total del tráfico que circula en ambas direcciones de una carretera en un día promedio, de modo que si se tiene una carretera de únicamente dos carriles (uno por sentido de tráfico), podría introducirse el valor de 50%, es decir que la mitad de tráfico circula en cada sentido, sin embargo, en carreteras que típicamente van más cargadas en un sentido (por ejemplo en zonas agrícolas o mineras) se prefiere utilizar el valor de 60%. En caso de que se trate de una carretera de cuatro carriles (dos por sentido), la Guía AASHTO en la Sección II, título 2.1.2 recomienda tomar primero

un factor por sentido de tráfico (50 a 60%) y afectarlo por un valor entre el 80 al 100% dependiendo de las condiciones particulares de la vía (altas pendientes o un gran porcentaje de vehículos livianos implican que el 100% de camiones circule por el carril de bajo tráfico), en este caso el valor a introducir en el programa estará entre el 40% al 60% dependiendo del criterio del diseñador y las condiciones reales de la vía.

La tabla de vehículos tiene la posibilidad de contar con 29 distintos tipos para el cálculo de Ejes Equivalentes, los mismos están simplemente numerados como Tipo 1, Tipo 2, etc., pero este nombre puede ser modificado simplemente presionando el botón “Tipo de Vehículos”, esto abre un cuadro de diálogo en el que se pueden re-nombrar todos los tipos de vehículos en función a las necesidades del usuario, vale decir: Livianos; Camiones; Buses; etc. El cambio de nombre afectará tanto al TPDA así como al cálculo de ejes equivalentes.

Al igual que en DIPAV 1, DIPAV 2.0 permite pegar en la tabla de cálculo del TPDA, los datos copiados de una hoja de cálculo MS Excel. Para ello, simplemente seleccione las celdas deseadas en Excel, presione CTR-C (manteniendo presionada la tecla “control” presione “C”) y para pegar los datos en DIPAV 2.0 presione CTR-V. La opción de copiar-pegar con el botón derecho del Mouse no está habilitada para trabajar dentro de DIPAV 2.0 pero pueden copiarse utilizando el teclado, celdas de una hoja DIPAV 2.0 a otra o dentro de la misma tabla.

Figura 4.5. – Cálculo del TPDA

Año	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 7	Tipo 8
2007	556	436	102	11	29	102	55	77
2008	578	451	107	12	31	106	58	80
2009	601	472	112	12	33	110	61	83
2010	624	491	116	13	36	114	63	86
2011	649	510	121	13	39	119	66	90
2012	676	531	126	14	42	124	69	93
2013	703	552	131	14	45	129	71	97
2014	731	574	136	15	48	134	74	101
2015	761	597	141	15	51	140	77	105
2016	791	621	147	16	54	145	80	109
2017	823	645	152	17	57	151	83	114
2018	856	671	158	17	61	157	86	118

Figura 4.6. – Cuadro de diálogo “Tipo de Vehículos”



### Cálculo del TPDA

Para el cálculo del número acumulado de vehículos en el período inicial de desempeño,

DIPAV 2.0 presenta la tabla mostrada en la Fig. 4.5 Se deben introducir los valores del Tráfico Promedio Diario Anual para cada tipo de vehículo que se especifique. También se debe colocar los años a los que estos valores representan. Se pueden introducir hasta 40 años.

### **Cálculo de Factores Equivalentes Vehiculares (FC)**

DIPAV 2.0 contiene programadas las fórmulas para obtener los FC de acuerdo al peso de cada eje y su configuración. La forma de introducir los datos es la siguiente: En la subpestaña “*Cálculo de Factores Equivalentes Vehiculares (FC)*” (ver fig. 3.9), en la parte superior existe una fila que indica “*Nomenclatura*” que cuenta con cuatro celdas para cada tipo de vehículo. La “*Nomenclatura*” corresponderá a la configuración de ejes del vehículo, de manera que debe colocarse los siguientes valores numéricos:

**1 - Para eje simple**

**2 - Para eje tándem**

**3 - Para eje tridem**

El eje delantero debe ubicarse siempre como el primero, en el caso de que el número de ejes sea menor a cuatro, se deben dejar las celdas restantes en blanco. De este modo, DIPAV 2.0 permite el cálculo de vehículos de hasta cuatro ejes, o bien vehículos de dos ejes con un acoplado de otros dos ejes. Sin embargo, si se requiere casos especiales con un mayor número de ejes, podría dividirse el vehículo y utilizar dos celdas.


Las siguientes cuatro filas requieren como dato el peso de cada eje especificado en la fila “*Nomenclatura*”. Las cargas deben introducirse en toneladas.

Finalmente, puesto que los Factores Equivalentes vehiculares dependen del desempeño mismo del pavimento, se debe verificar que se ha introducido un valor del espesor de losa estimado, para el caso de pavimento rígido o bien el número estructural estimado para el caso de pavimento flexible, el cual puede ser modificado una vez que se calcule el valor real mediante DIPAV 2.0. En las celdas indicadas a continuación, DIPAV 2.0 muestra los valores de los factores equivalentes calculados para cada uno de los ejes. Para ello se debe

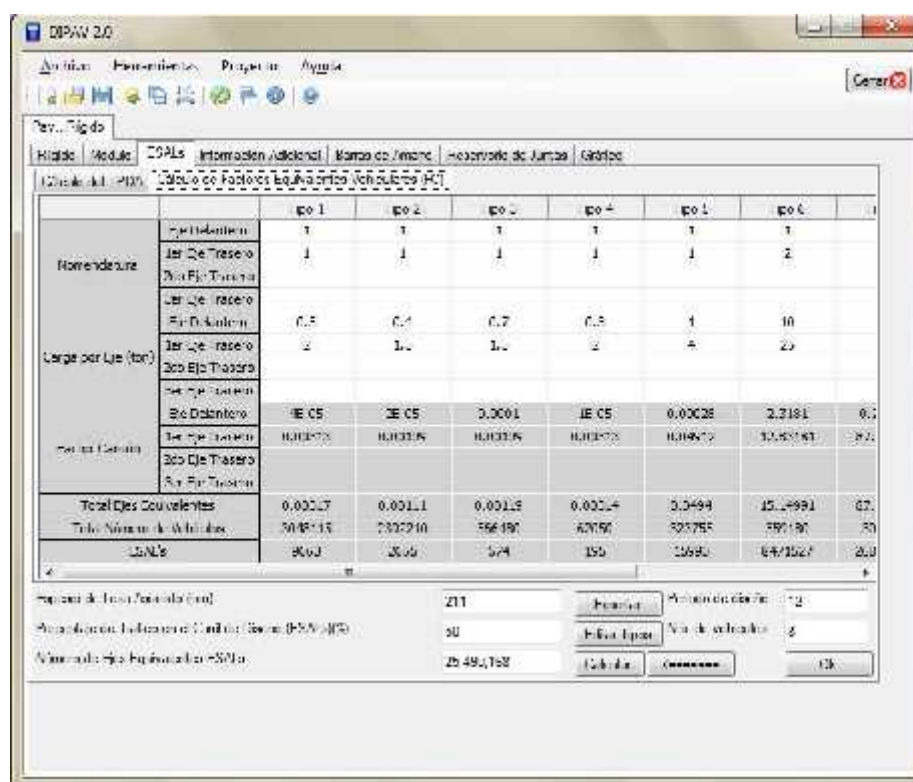
presionar el botón “*Calcular*” Ubicado en la parte inferior del formulario.

Esta acción permite además calcular la suma total de vehículos por cada tipo, para lo cual DIPAV los multiplica por 365 (para considerar el acumulado anual), en base a ello, calcula el valor total de ejes equivalentes que solicitará la carretera.

Una vez revisados y aceptados los valores, se puede presionar el botón “(Volver)”,

 acción que regresa a la pantalla principal de diseño del pavimento copiando el valor de ejes equivalentes recientemente calculado. Alternativamente se puede volver haciendo clic en la pestaña *Rígido*. La fig. 4.7 muestra el cálculo de ejes equivalentes.

**Figura 4.7. – Matriz para el cálculo de factores equivalentes vehiculares**



	tipo 1	tipo 2	tipo 3	tipo 4	tipo 5	tipo 6	
Nomendature	Eje Independiente	1	1	1	1	1	1
	Eje De Tracción	1	1	1	1	1	2
	Eje De Tracción						
Carga por Eje (ton)	Eje De Tracción	0.5	0.4	0.2	0.3	1	10
	Eje De Tracción	2	1.5	1.5	2	5	25
	Eje De Tracción						
Total Ejes	EJE 05	EJE 05	0.0001	EJE 05	0.00028	2.3181	0.0
	EJE 05	0.00073	0.0006	0.0006	0.00073	0.00073	0.0
	EJE 05						
<b>Total Ejes Equivalentes</b>	<b>0.0007</b>	<b>0.0011</b>	<b>0.0015</b>	<b>0.0024</b>	<b>0.0494</b>	<b>15.4991</b>	<b>0.0</b>
<b>Total Número de Vehículos</b>	<b>208113</b>	<b>230210</b>	<b>566197</b>	<b>620797</b>	<b>525755</b>	<b>390197</b>	<b>30</b>
<b>EJE 05</b>	<b>800</b>	<b>2000</b>	<b>574</b>	<b>150</b>	<b>10690</b>	<b>647027</b>	<b>200</b>

Si usted no puede visualizar correctamente los datos contenidos en una tabla, bastará con hacer doble clic en el borde derecho de la columna para que ésta se autoajuste al contenido.

#### 4.2.1.2.- Métodos Mecanicistas

##### 4.2.1.2.1.- BS PCA

A continuación, se presentan las características de los datos de entrada del programa BS PCA:

Una vez abierto BS PCA, los menús presentados en la parte superior de la pantalla son: “*Opciones*”; “*Sensibilidad*”, y “*Terminar*”. El primero “*Opciones*”, contiene todas las funciones inherentes al manejo de documentos, cargar; guardar; calcular e imprimir. El Menú “*Sensibilidad*” permite hacer un análisis de sensibilidad. La pantalla inicial de BS PCA, se muestra a continuación:

**Figura 4.8.- Pantalla principal programa BS-PCA**

The screenshot shows the main window of the BS-PCA software. The title bar reads "BS-PCA - DISEÑO PAVIMENTOS RIGIDOS PCA". The menu bar includes "Opciones", "Sensibilidad", and "Terminar". The interface contains several input fields and buttons:

- Resistencia K del Apoyo:** A text box with "100" and a dropdown menu set to "Mpa/m".
- Espesor de la Losa:** A text box with "100" and a dropdown menu set to "mm".
- Módulo de Rotura Losa:** A text box with "1000" and a dropdown menu set to "Mpa".
- TRANSITO:** A dropdown menu set to "KN".
- Factor de Seguridad Digna:** A text box.
- Factor de Mayoración de Repeticiones:** A text box.
- Buttons:** "Ejes Sencillos", "Ejes Tandem", "Ejes Tridem", "Calcular", "Imprimir", "Salir", "Cargar", and "Guardar".
- Checkboxes:** "Con Berritas" and "Con Paralelos".
- Bottom Section:** "Total Consumo Estructura (%)" and "Total Consumo Fricción (%)" with corresponding text boxes.

Los datos de entrada son los siguientes:

- Resistencia del Apoyo:** Se podrá introducir el valor K correspondiente a la resistencia de la capa de subrasante ó subbase en cualquiera de las siguientes unidades: MPa/m, Tn/m<sup>3</sup>, PCI.

This close-up shows the "Resistencia K del Apoyo" input field. The text box contains "100". The dropdown menu is open, showing the following options: "Mpa/m" (selected), "Mpa/m", "Tn/m3", and "PCI (lb/pulg3)".

**b. Espesor de la Losa:** En este campo se deberá digitar el espesor de losa propuesta, el espesor podrá tener cualquiera de las siguientes unidades: mm, pulgadas.

**c. Módulo de Rotura de la Losa:** Valor que corresponde al módulo de rotura de la losa a construir, puede estar dada en las siguientes unidades: Mpa, Kg/cm<sup>2</sup>, PSI.

**d. Bermas:** Se tendrá la posibilidad de seleccionar si el pavimento tendrá bermas ó no.

**e. Pasadores:** Se tendrá la posibilidad de seleccionar si el pavimento tendrá pasadores ó no.

**f. Tránsito:** El sistema permite la entrada de las cargas de tránsito a ser soportadas por el pavimento discriminado por ejes sencillos, tándem y tridem dadas en kN, Tn ó Kips.

Para cada uno de los ejes se deberán digitar las cargas y repeticiones resultantes del análisis de tránsito de la vía en estudio.

**Figura 4.9.- Pantalla de introducción de ejes**

#	Carga Eje (kN)	Repetición	Ejes
1	125	14	11
2	115	30	20
3	107	64	30
4	98	103	40
5	89	233	50
6	80	307	60
7			
8			
9			
10			

El tránsito introducido podrá ser modificado por dos factores que permiten mayorar las cargas ó las repeticiones así:

**Factor de Seguridad de Carga:** Valor que afectará las cargas por eje del tránsito.

Factor de Seguridad Carga : 1.2

**Factor de Mayoración de Repeticiones:** Valor que permitirá mayorar las repeticiones de carga por eje digitadas.

Factor de Mayoración de Repeticiones : 1

Datos de entrada:

**Figura 4.10.- Datos de entrada del programa BS PCA**

Resistencia K del Apoyo : 80 Mpa/m

Espesor de la Losa : 190 mm

Módulo de Hctura Losa : 4.5 Mpa

Con Berrins

Con Pasadres

TRÁNSITO

KN

Factor de Seguridad Cerca : 1.2

Factor de Mayoración de Repeticiones : 1

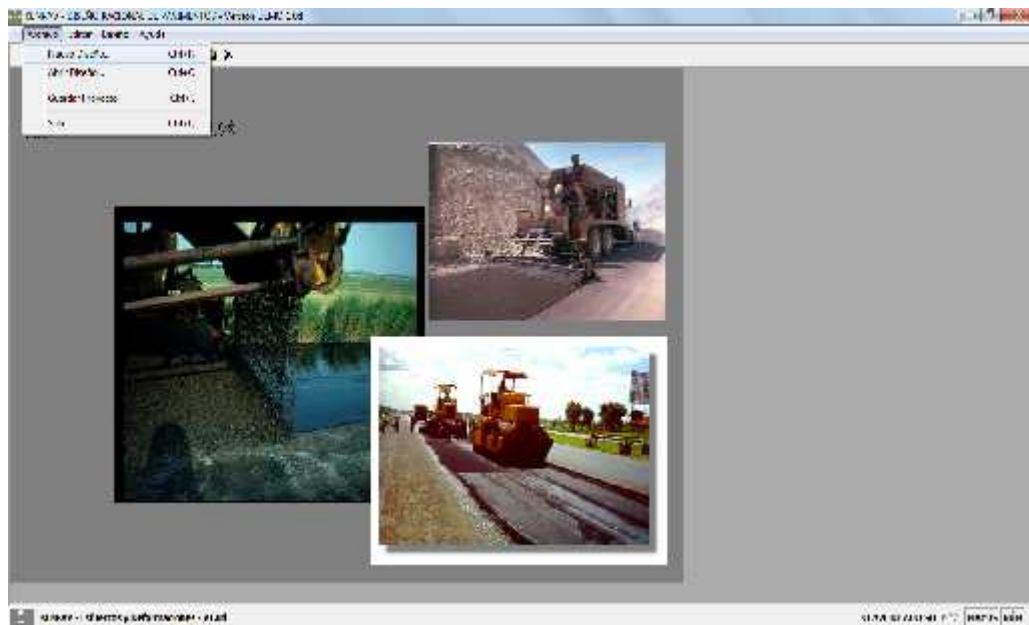
Ejes Sencillos Ejes Tandem Ejes Trijdem

#### 4.2.1.2.2.- KENPAV

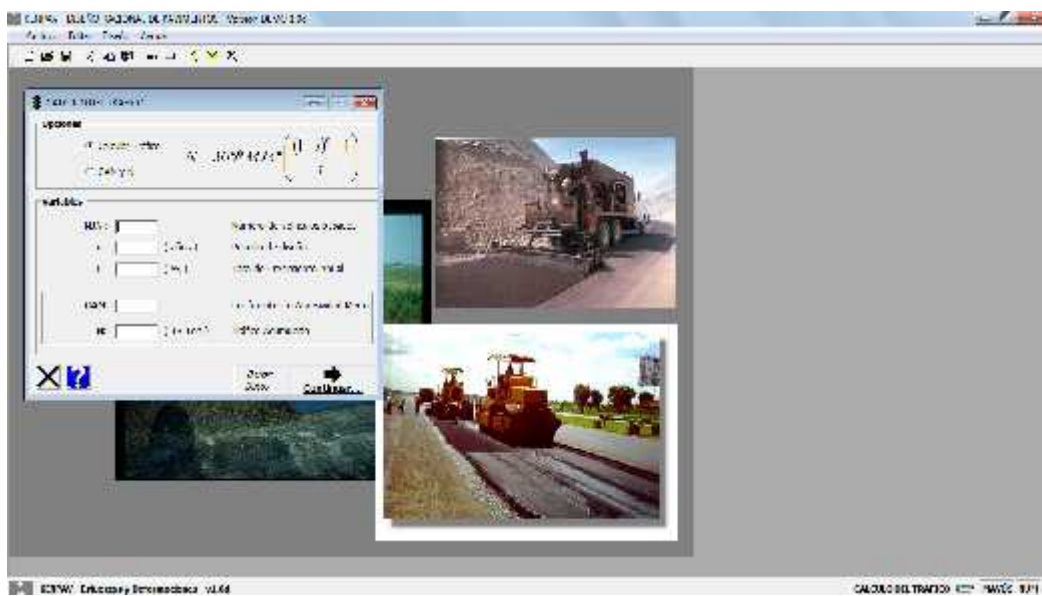
A continuación, se presentan las características de los datos de entrada del programa KENPAV:

Una vez abierto KENPAV, los menús presentados en la parte superior de la pantalla son: “*Archivo*”; “*Editar*”, “*Diseño*” y “*Ayuda*”. El primero “*Archivo*”, contiene todas las funciones inherentes al manejo de documentos, nuevo diseño; abrir diseño; guardar proyecto y cierre del programa. El Menú “*Editar*” permite copiar, cortar pegar. El Menú “*Diseño*” permite calcular el tráfico y modificar los parámetros de diseño. Finalmente el menú “*Ayuda*” contiene un acceso para desplegar ayuda en línea y también información adicional sobre el desarrollo del programa. La pantalla inicial de KENPAV se muestra a continuación:

**Figura 4.11.- Interfaz Principal del Programa KENPAV**



**Figura 4.12.- Calculo del Tráfico**



Los datos de entrada son los siguientes:

El programa nos da la opción de calcular el tráfico con las siguientes variables:

- a. MJA: Numero de Vehículos Pesados.
- b. n: Periodo de Diseño (años).
- c. i: Tasa de Crecimiento Anual (%).
- d. CAM: Coeficiente de Agresión Media.

Estas variables están desarrolladas en las páginas 74 y 75 del Capítulo 3 del presente trabajo.

O bien podemos insertar directamente el tráfico acumulado y obviar los anteriores datos.

N:  ( 13 Ton ) Tráfico Acumulado

Posteriormente elegimos el tipo de estructura:

**Figura 4.13.- Tipo de estructura – Estructura calzada en Concreto**

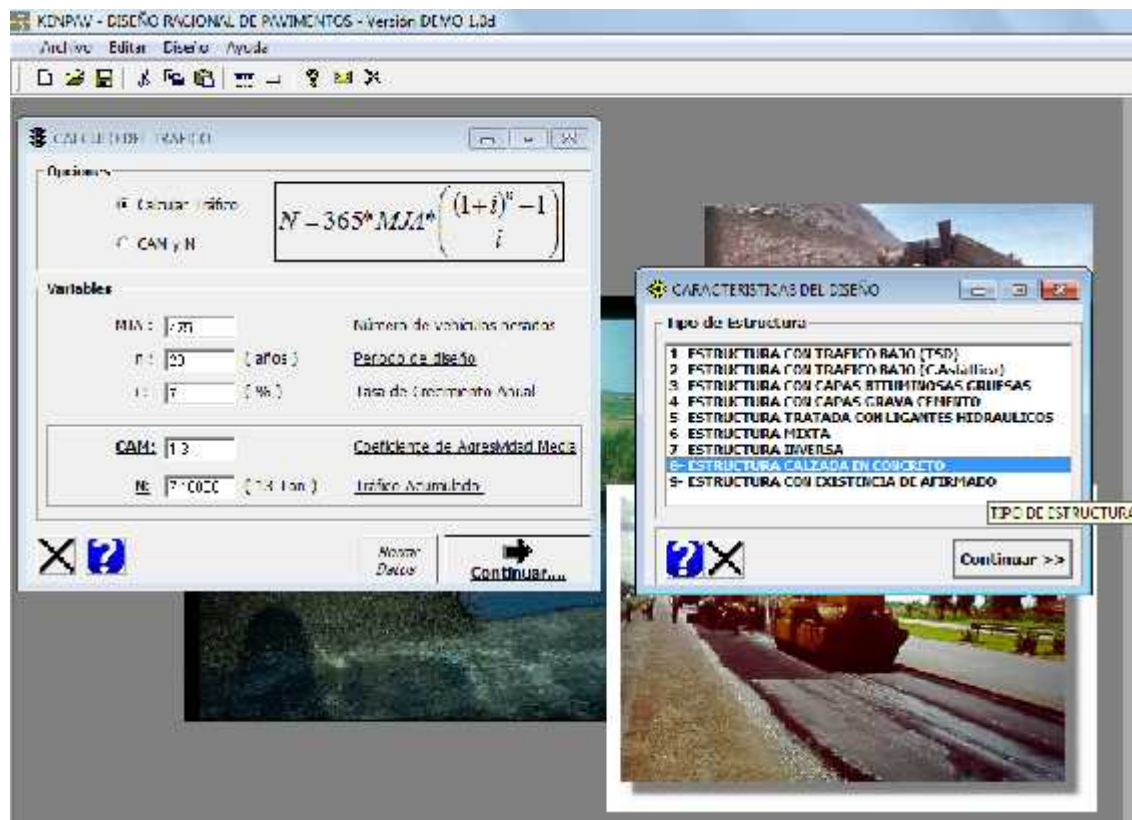


Figura 4.14.- Interfaz - Estructura con Calzada en Concreto del Programa KENPAV

Capa	E (MPa)	$\mu$	$\sigma_b$ (MPa)*	1/h	SN	Sh (cm)	R (%)	H (m)
Concreto	35000	0.25	2.15	16	1	1	5.0	0.20
Fundación	24000	0.25	1.63*	15	1	3	50.0	0
Subrasante	50	0.35	---	---	---	---	Tabla	---

Esta parte contiene:

- a. Información conocida

CAPAS:

CAM:

Num. Ejes:

- b. Parámetros de diseño utilizados

Radio de Contacto:

Presión de Contacto:

Distancia entre Ejes:

# Posiciones Eje:

c. Características de la calzada (única opción)



d. Optimizar (única opción)



Figura 4.15.- Datos Estructurales del programa KENPAV

Datos Estructurales								
Capa	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_6$ (MPa) <sup>10°C, 25Hz</sup>	-1/b	SN	Sh(cm)	R (%)	H (m)
Concreto	35000	0.25	2.15	15	1	1	5.0	0.20
Fundación	24000	0.25	1.63	15	1	3	50.0	0
Subrasante	50	0.35	----	---	---	----	Table	----

En esta parte como podemos observar tenemos los datos estructurales:

- **E**: Es el módulo de elasticidad del material en MPa.
- **$\nu$** : Es el coeficiente de poisson del material.
- **$\sigma_6$  (10°C, 25Hz)**: Es el esfuerzo para el cual la ruptura convencional en flexión.
- **-1/b**: Es la pendiente de la ley de fatiga del material.
- **SN**: Es la dispersión del material en el ensayo de fatiga.
- **Sh**: Es la dispersión del material por extendido en la construcción, dado en cm.
- **R**: Es el riesgo de ruina admitido para el periodo de diseño, dado en porcentaje.
- **H**: Es el espesor de la capa dado en m.

### 4.2.1.3.- Métodos Empírico-Mecanicistas

#### 4.2.1.3.1.- M-E PDG

A continuación, se presentan las características de los datos de entrada del programa M-E PDG:

**Figura 4.16.- Interfaz principal del programa M-E PDG**

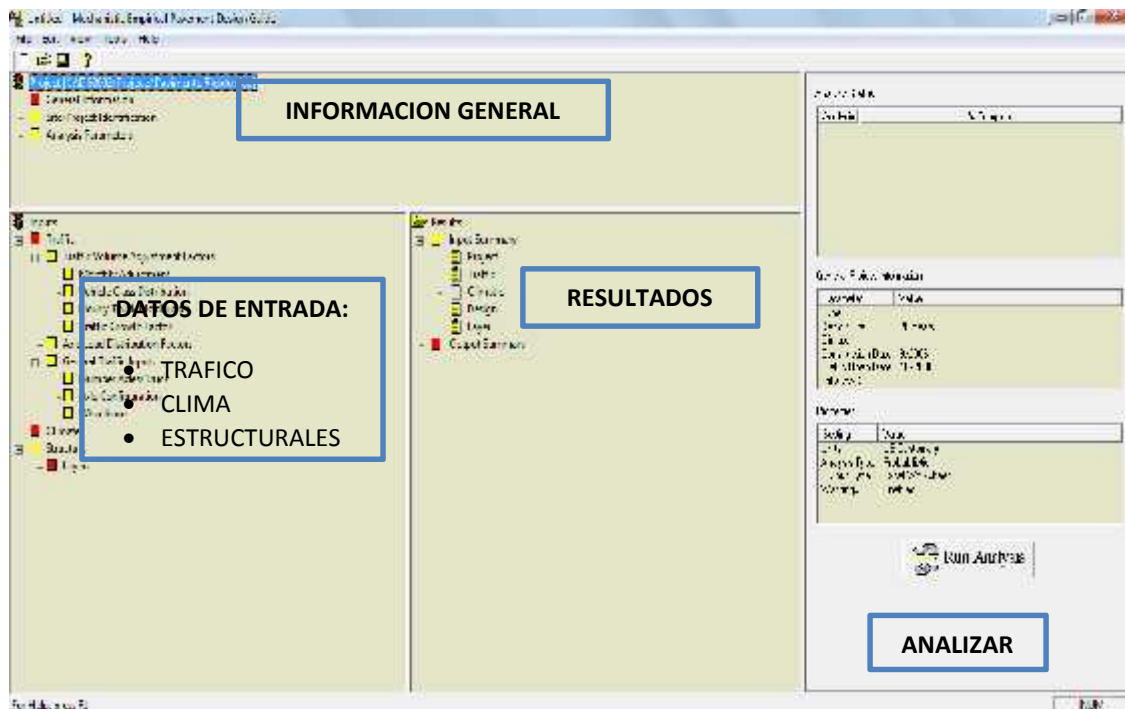


Una vez abierto M-E PDG, los menús presentados en la parte superior de la pantalla son: “*File*”; “*Edit*”, “*View*”, “*Tools*” y “*Help*”. El primero “*File*”, contiene todas las funciones inherentes al manejo de documentos, nuevo diseño; abrir diseño; guardar proyecto y cierre del programa. El Menú “*Edit*” permite borrar o limpiar. El Menú “*View*” contiene las opciones “*Toolbar*” y “*Status Bar*”. El menú “*Tools*” contiene opciones como Calibración de los distintos escenarios, uso de otros programas compatibles. Finalmente el menú “*Help*” contiene un acceso para desplegar ayuda en línea y también información adicional sobre el desarrollo del programa.



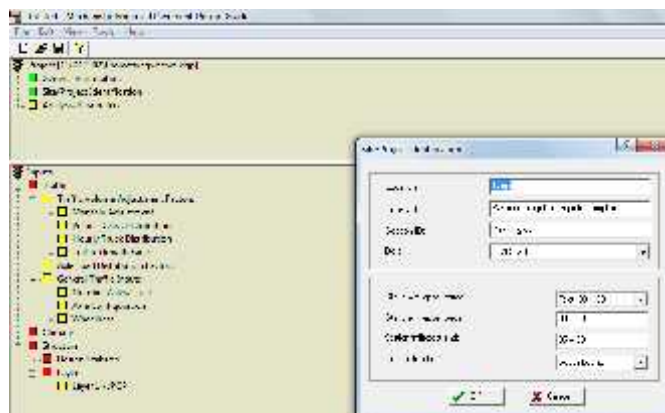
- a. Información General
- b. Datos de entrada
  - b.1 Tráfico
  - b.2 Clima
  - b.3 Estructurales
- c. Resultados
- d. Analizar o Ejecutar Análisis

**FIGURA 4.19.- Pantalla Inicial después de crear un proyecto**

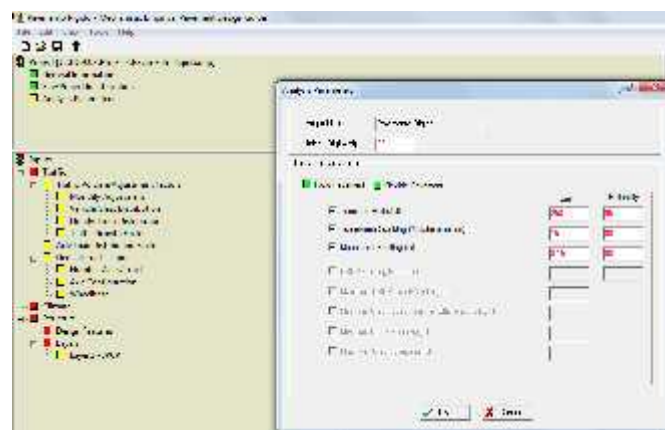




**Figura 4.22.- Identificación del Proyecto**



**Figura 4.23.- Parámetros de Análisis**



**Figura 4.24.- Pantalla Principal del Tráfico**

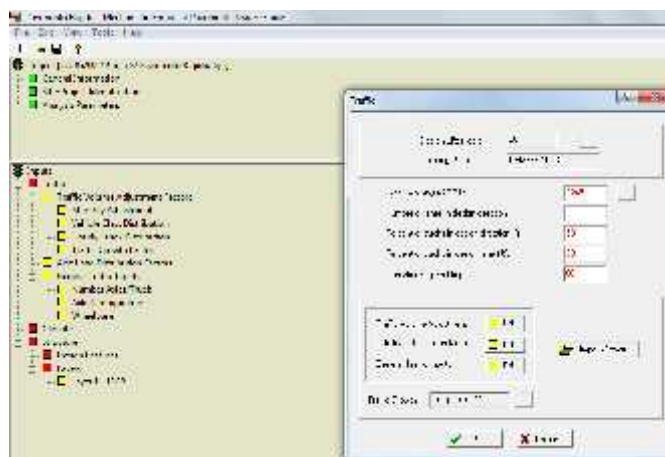


Figura 4.25.- Factor de Ajuste Mensual – Level 3 Default

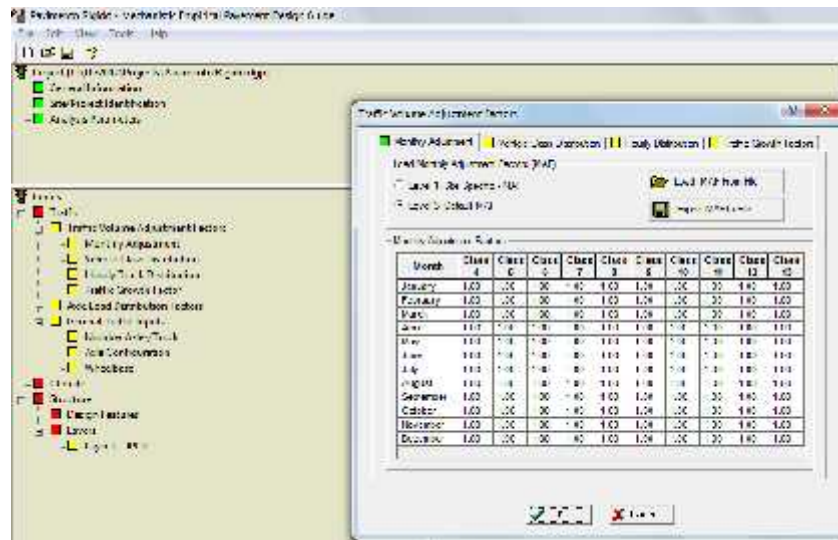
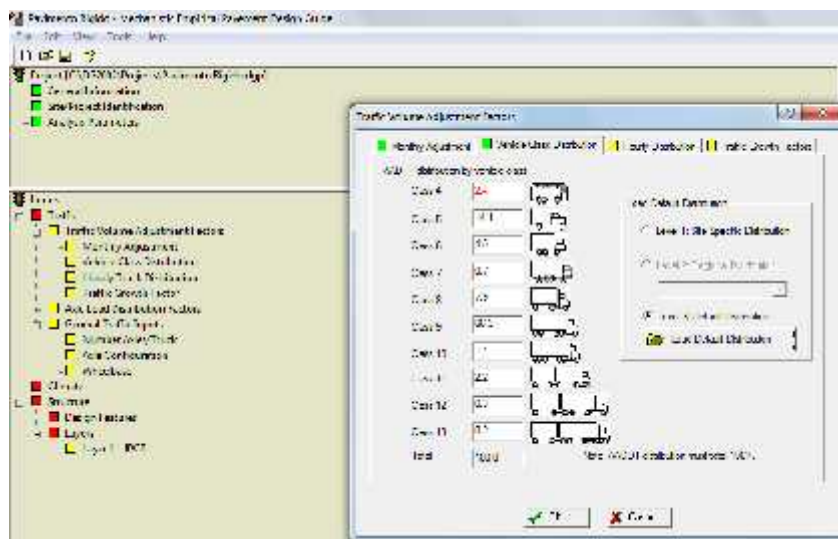
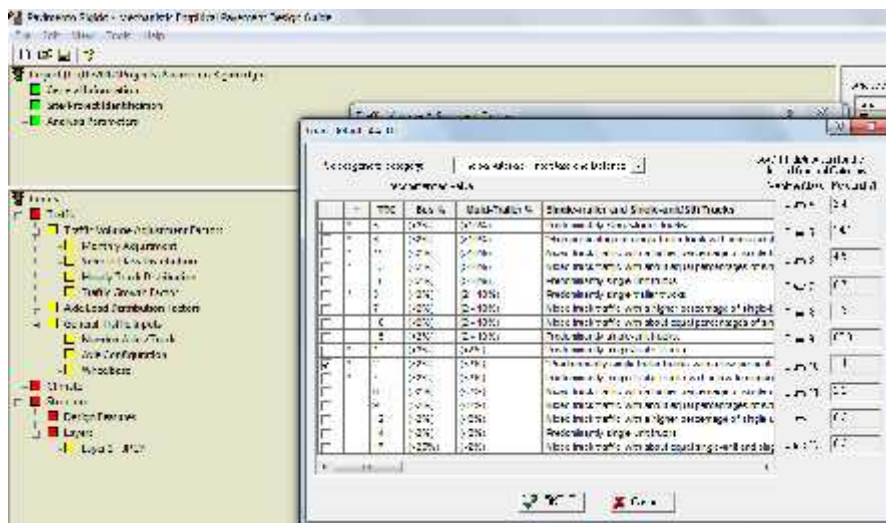


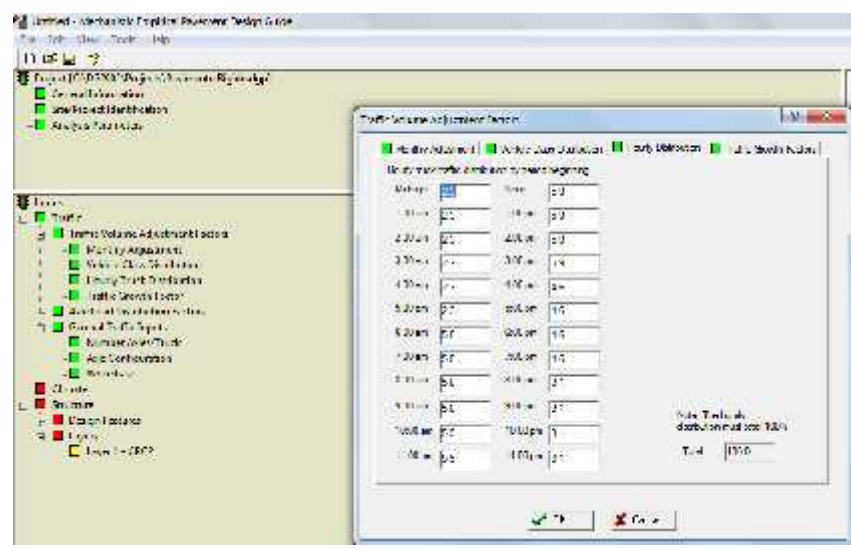
Figura 4.26.- Distribución de Clase de Vehículos



**Figura 4.27.- Utilizar TTC 2 como la Distribución por Default**

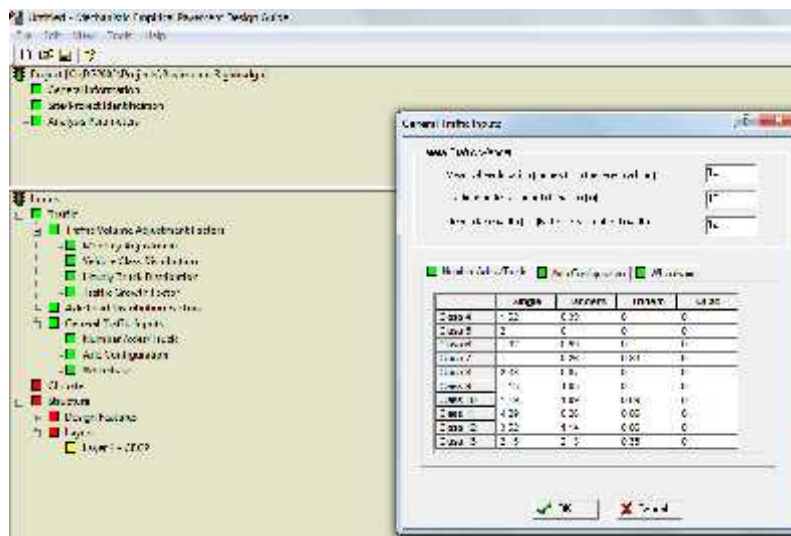


**Figura 4.28.- Distribución por Hora – Por Default**





**Figura 4.31.- Distancia del Eje al Borde y Número de Ejes por Camión**



**Figura 4.32.- Configuración de Ejes por Default**

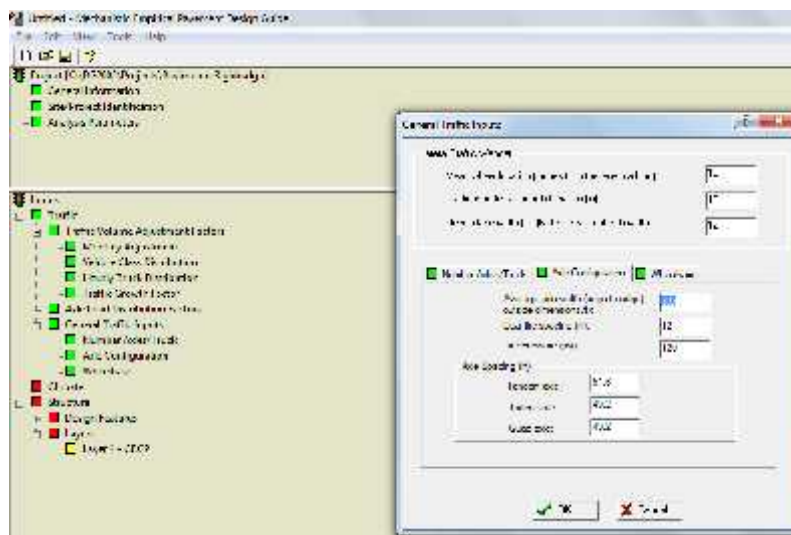


Figura 4.33.- Distancia entre Ejes

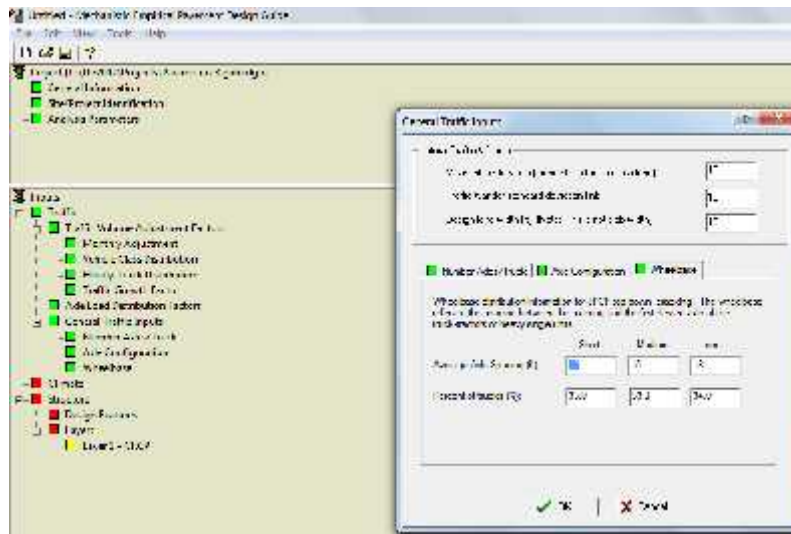
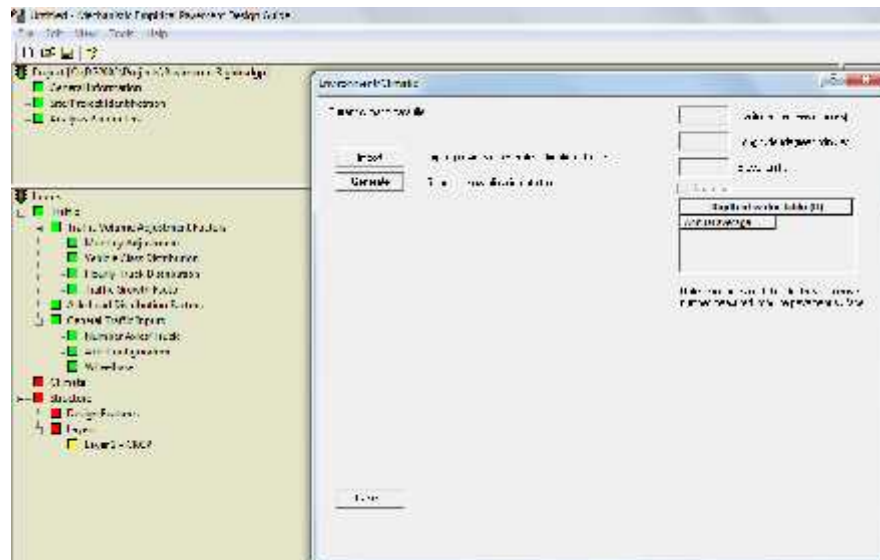
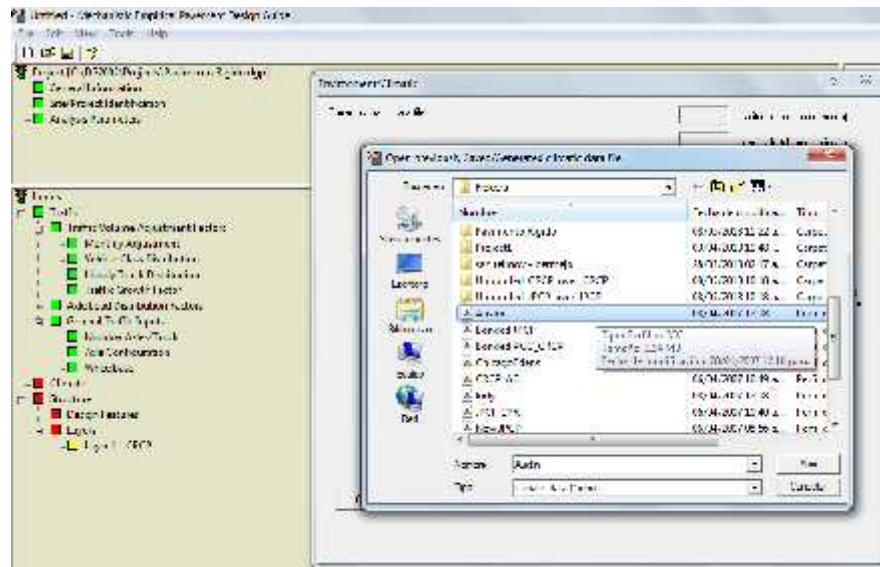


Figura 4.34.- Importamos Clima



**Figura 4.35.- Seleccionamos la Ciudad del Diseño**



### Diseño Preliminar

El usuario debe proponer un diseño preliminar

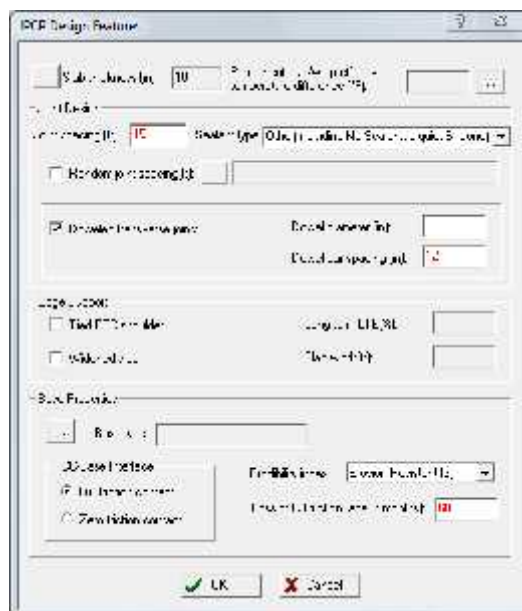
Utilizamos como ejemplo el siguiente diseño:

- PCC (Concreto de Cemento Portland).- Capa de 10” de espesor
- Capa estabilizada con cemento.- Capa de 4” de espesor
- Base de piedra granular triturada.- 6” de espesor
- Subrasante A-6 (AASHTO)

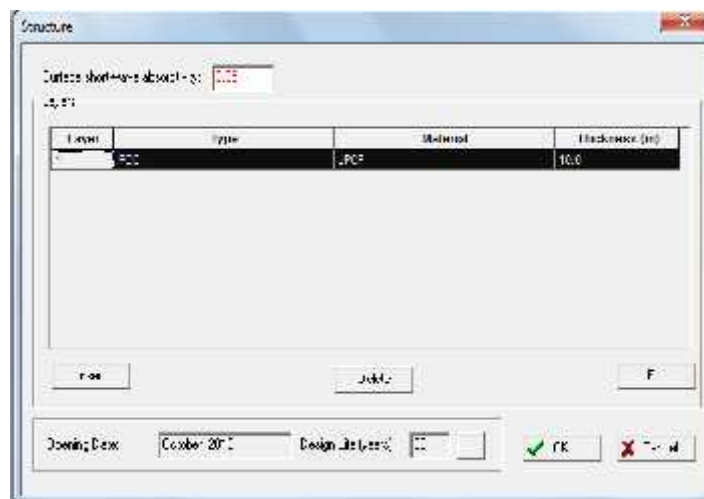
Diseño de Prueba – Propiedades del JPCP

- Losa de 15 pies de largo
- Pasa-juntas de 1” de diámetro para las juntas transversales
- Espacio de 12” entre cada pasa juntas
- No habrá pasa-juntas entre juntas longitudinales
- Drenaje al borde de la berma

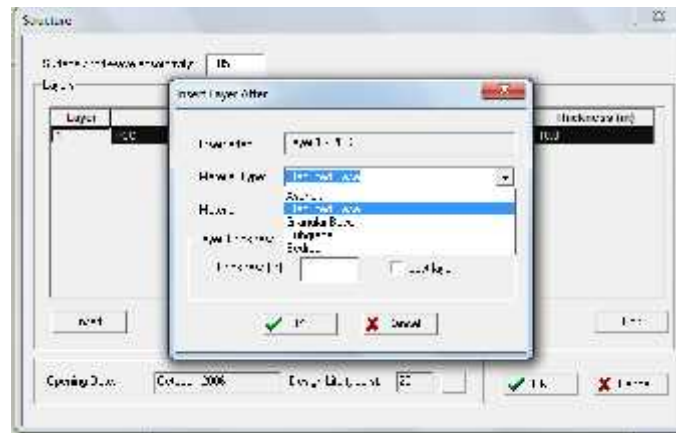
**Figura 4.36.- Características de Diseño para Pavimento Rígido con Junta Normal (JPCP)**



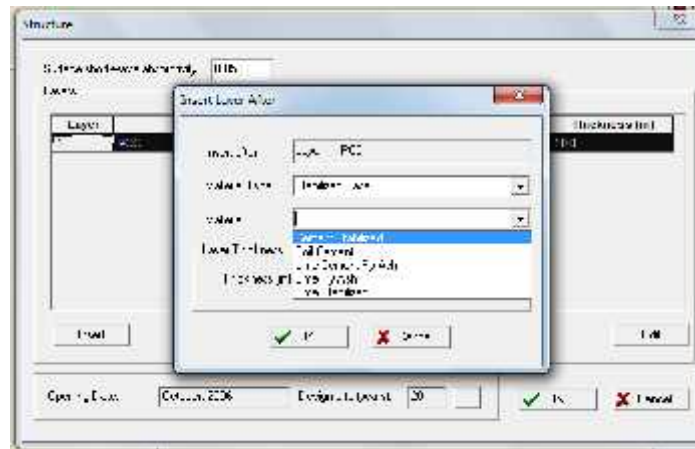
**Figura 4.37.- Agregar Capas**



**Figura 4.38.- Tipo de Capa**



**Figura 4.39.- Material de la capa**



**Figura 4.40.- Espesor de la Capa**

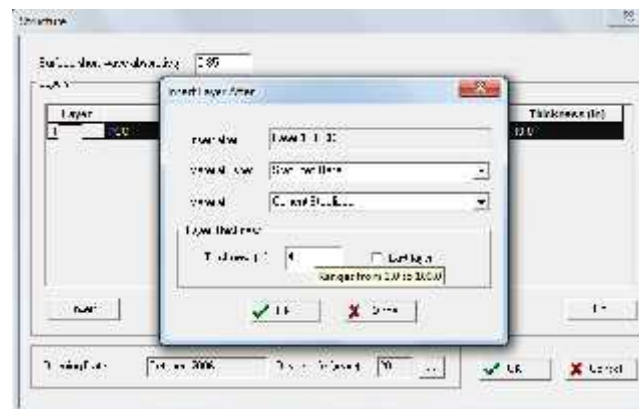


Figura 4.41.- Descripción de las capas que se van agregando

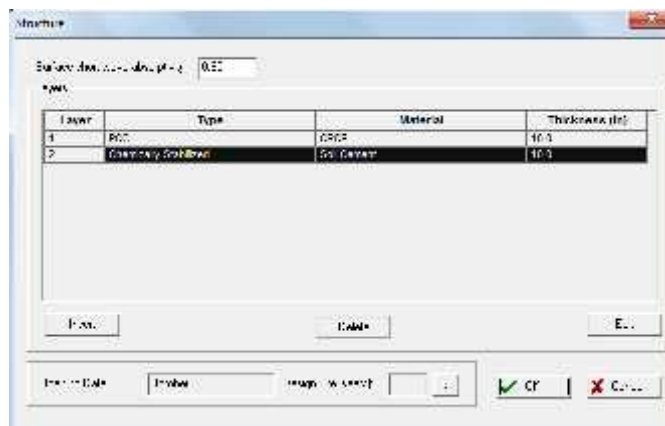


Figura 4.42.- Tabla final de todas las capas



Figura 4.43.- Propiedades generales y térmicas del concreto

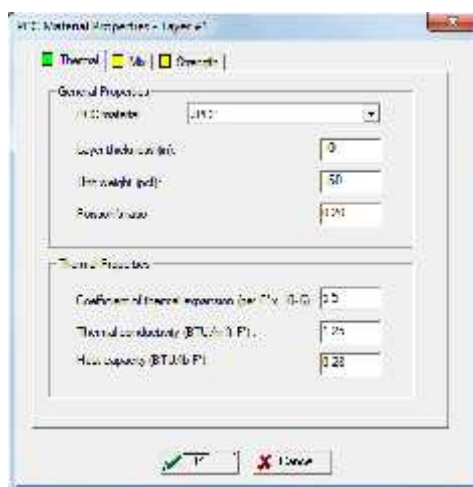
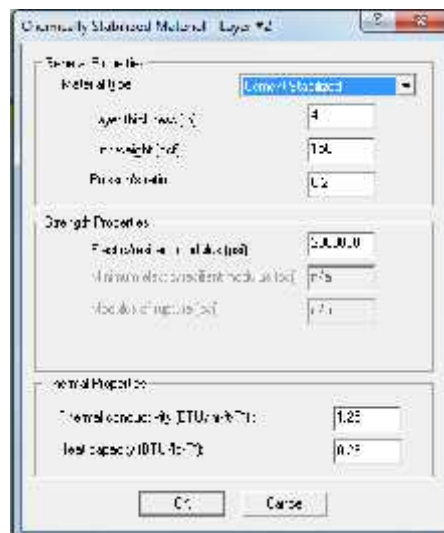


Figura 4.44.- Mezcla del concreto y propiedades de contracción

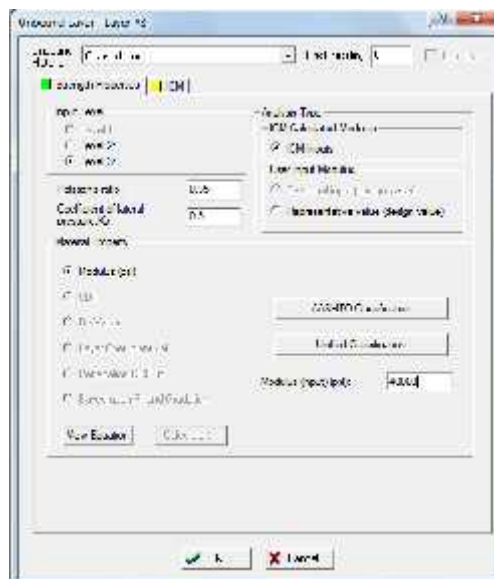
Figura 4.45.- Propiedades de Resistencia del concreto – Nivel 1

Time	sigma (MPa)	fRt (MPa)
1 Day	380000	0.3
7 Day	430000	0.45
28 Day	470000	0.6
56 Day	490000	0.7
28 Year (28 Day)	52	1.2

**Figura 4.46.- Propiedades del cemento estabilizado**



**Figura 4.47.- Propiedades de resistencia de la capa base sin consolidar**







## 4.2.2.- Procesamiento

Es la capacidad del sistema de información para efectuar cálculos de acuerdo con una secuencia de operaciones preestablecidas. Estos cálculos pueden efectuarse con datos introducidos recientemente en el sistema o bien con datos que están almacenados. Esta característica de los sistemas permite la transformación de datos fuente en información que puede ser utilizada para la toma de decisiones.

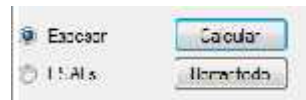
### 4.2.2.1.- Métodos Empíricos

Cada programa tiene un único tipo de **proceso de datos**, sus propias operaciones matemáticas y lógicas como también sus limitaciones.

#### 4.2.2.1.1.- DIPAV 2.0

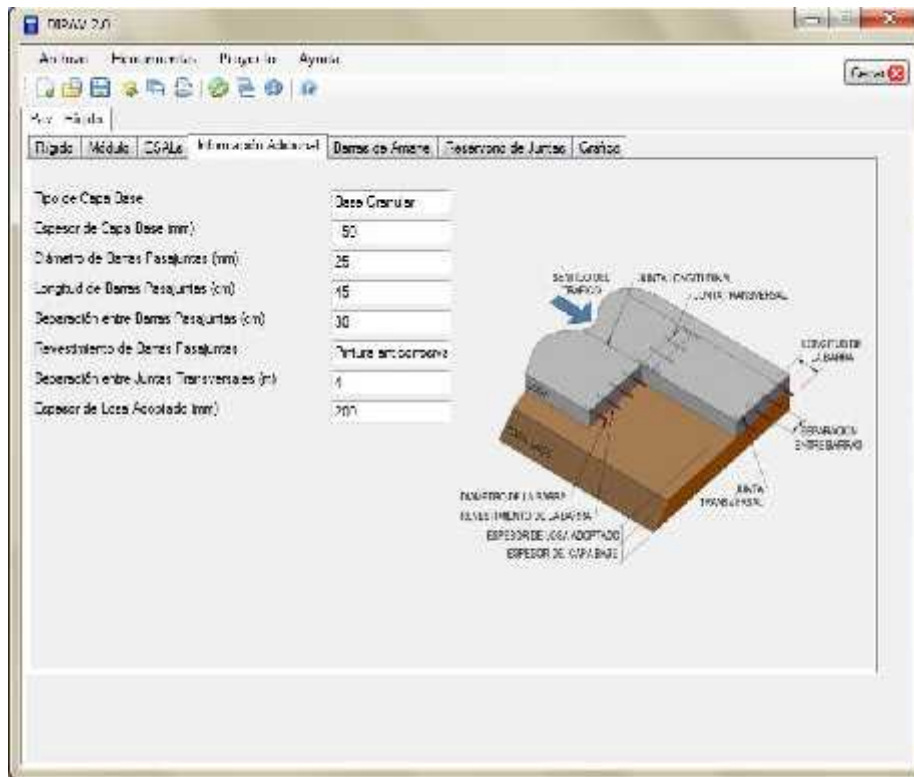
A continuación, se presentan las características de los datos del procesamiento del programa DIPAV 2.0.

Teniendo todos los datos de entrada completos podemos hacer click en el botón:



También existen diversas características de los pavimentos rígidos que no forman parte del diseño estructural del espesor de losa, pero son importantes para su desempeño y por tanto requieren una mayor atención, estas son: acero en juntas transversales y longitudinales, dimensiones y características del sello de juntas y espaciamiento entre juntas transversales. Haciendo clic en la pestaña “*Información Adicional*” se puede detallar los siguientes elementos que se describen a continuación:

**Figura 4.52. – Información adicional de pavimento rígido**



”*Tipo de Capa Base*”, es un campo de información alfanumérico para colocar el material de la base, su valor de CBR y cualquier otra descripción relativa a esta capa. Para detallar el espesor de la base se ha destinado un campo específico. Ambos campos se imprimen en el reporte pero no son necesarios para el cálculo ya que la influencia de la base estaría implícita en el módulo de reacción del terreno “k”.

En caso de que el pavimento requiera la colocación de barras pasajuntas, se puede utilizar las siguientes cuatro casillas para introducir información acerca de las mismas. El diámetro de las barras, si bien aparece solo como información puede ser calculado de una manera muy sencilla. La guía AASHTO en la Parte II, 2.4.2., simplemente recomienda utilizar un diámetro igual o mayor a 1/8 del espesor de la losa. El espaciamiento también se encuentra normalizado en 30 cm y la longitud típica de barras es de 45 cm. En casos especiales estos valores pueden ser modificados pero se requiere mayores criterios de diseño para hacerlo.

La casilla “*Revestimiento de barras pasajuntas*” se utiliza para especificar el tipo de recubrimiento que deben tener las barras pasajuntas. Normalmente, para ello se especifica pintura anticorrosiva epóxica y una capa delgada de antiadherente. Existen también barnices que a la vez confieren un efecto antiadherente y anticorrosivo a las barras. Todos estos aspectos pueden detallarse en esta casilla.

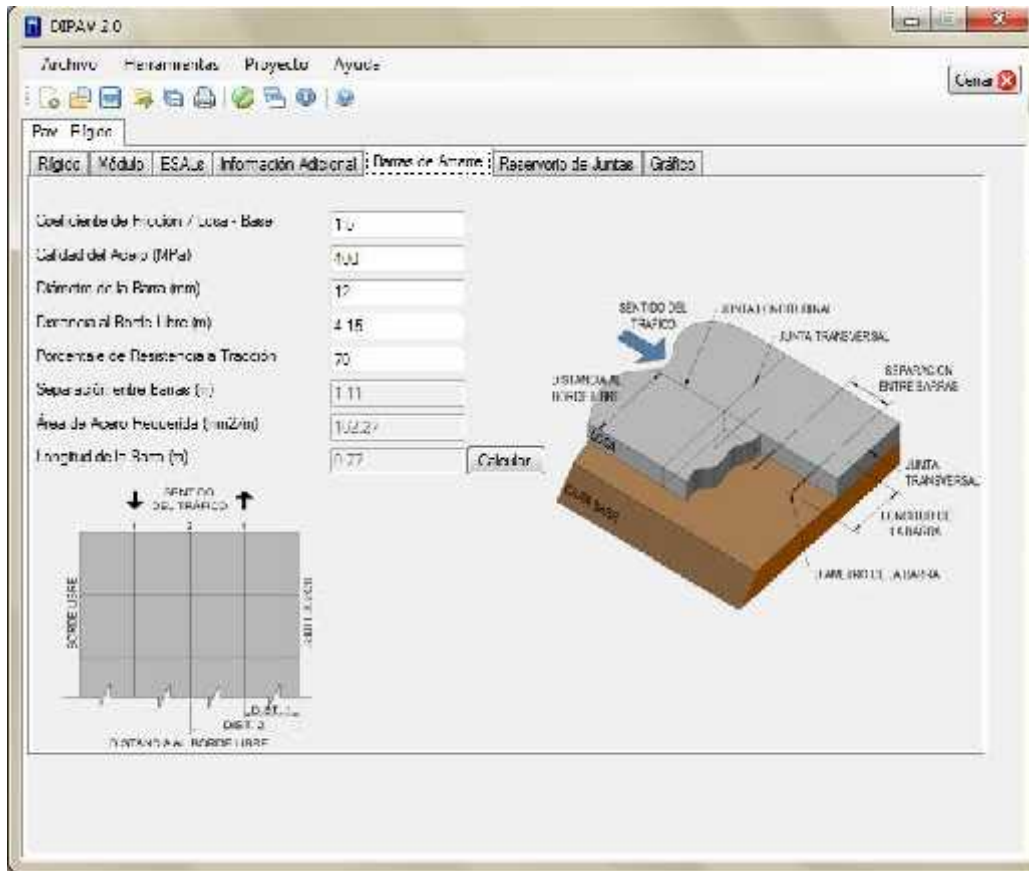
La casilla “*Separación entre juntas transversales*” es muy importante, puesto que es una propiedad estructural. Su determinación se basa en las tensiones que causarían fisuras intermedias en la losa. Los factores importantes a considerar incluyen el coeficiente térmico de contracción del hormigón (el cual depende primordialmente del tipo de agregado grueso usado); el gradiente térmico local; la resistencia friccional entre la losa y la base (que depende del tipo de base, sus condiciones de terminado y si existe o no imprimación) y la resistencia a tracción del hormigón.

Es importante considerar experiencias previas con materiales similares y prácticas de construcción. Como una regla general de AASHTO, para hormigón simple con juntas, el espaciamiento no debe exceder 24 veces el espesor de la losa. Por otra parte, la relación entre la longitud de la losa al ancho no debe exceder 1.25. Por tanto el espaciamiento máximo entre juntas para una losa de 25 cm de espesor y de 3.7 m de ancho debería ser 6 m por el primer criterio y 4.6 m por el segundo criterio. En todo caso también debe tenerse presente las condiciones climáticas, el tipo de base y la existencia o no de barras pasajuntas. El IBCH recomienda no utilizar espaciamientos mayores a 4.50 m ni anchos superiores a 4.15 m.

El valor que se introduce en esta casilla es importante para realizar el cálculo de la apertura de juntas y el diseño de reservorio para el sellador

### a.- Diseño de Barras de Amarre en la Junta Longitudinal

Figura 4.53. – Diseño de barras de amarre



Antes de acceder a esta opción se deben llenar los valores de *espesor adoptado* y *separación entre juntas transversales* en la pestaña “**Información Adicional**”.

Las barras de amarre de acero corrugado se colocan entre carriles, de manera perpendicular a la junta longitudinal para que la misma no se separe con el tiempo. También se utiliza para vincular una berma de hormigón al carril contiguo. Estas barras se colocan en el hormigón fresco hincadas por equipo deslizante o bien a mano en caso de utilizar moldes. Algunos diseñadores indican que no debería vincularse más de 12 m de ancho de pavimento, es decir cuatro carriles. En los casos de pavimentos urbanos que estén confinados mediante bordillos o cunetas adecuadamente anclados a la subrasante, las barras de amarre pueden obviarse, sin

embargo, en el caso de curvas cerradas, por ejemplo, donde la acción de la fuerza centrífuga añade un importante esfuerzo horizontal en las losas, estas barras deberían utilizarse de todos modos.

Para determinar tanto el espaciamiento entre barras así como su longitud, de acuerdo con la Guía AASHTO, Parte I. Sección 1.6.2, se requiere definir el diámetro de la barra; la resistencia característica del acero; la distancia desde la junta longitudinal al borde libre más próximo (es decir el ancho de la losa de borde); el espesor de la losa; el factor de fricción; y el porcentaje de diseño de tensión de fluencia para la barra de acero de amarre. Estos factores se detallan a continuación:

### **Factor de Fricción**

Es una medida de la resistencia de fricción entre la parte inferior de la losa y la parte superior de la capa de apoyo subyacente, ya sea base o subrasante. Los valores recomendados para distintos materiales de capa de apoyo se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 4.1. – Factor de fricción para materiales bajo la losa de pavimento rígido**

<b>Material Bajo la Losa</b>	<b>Factor de Fricción</b>
Tratamiento superficial	2.2
Estabilización con Cal	1.8
Estabilización asfáltica	1.8
Estabilización con Cemento	1.8
Grava de Río	1.5
Piedra Partida	1.5
Arenisca	1.2
Subrasante Natural	0.9

Fuente: AASHTO Guía de Diseño Parte II. Sección 2.5.1.

### **Calidad de Acero**

Se refiere al límite de fluencia del acero que se utilizará para barras de amarre, expresado en MPa.

En los casos en los que se realiza la construcción carril por carril las barras de acero están

expuestas a golpes y dobladuras, motivo por el cual es preferible el uso de aceros naturales más dúctiles, por tanto de límite de fluencia de 400 MPa es típicamente utilizado para este fin. El coeficiente de seguridad que evita que el acero sufra tensiones excesivas o deformaciones plásticas es el porcentaje de resistencia a la tracción.

### **Diámetro de las Barras**

Los diámetros preferidos para pavimentos rígidos son 16 y 12 mm, el primero para losas gruesas y donde se espera un mayor número de vehículos pesados que se cambien de carril constantemente (por ej. en vías de cuatro carriles). En el país se ha utilizado normalmente el diámetro de 12 mm. En pavimentos urbanos de bajo tráfico podría utilizarse inclusive 10 mm de manera excepcional. El acero de amarre debe ser siempre corrugado, como sugerencia constructiva, la parte central de la barra (unos 15 cm) debe ser pintado con pintura anticorrosiva ya que, aunque en menor grado que el acero de barras pasajuntas transversales, está sujeto a condiciones de corrosión. El método de diseño sugerido por DIPAV 2.0 requiere que el diseñador defina el diámetro.

### **Distancia al Borde Libre**

La distancia al borde libre más cercano es la distancia desde la junta longitudinal que se analiza al borde libre de la losa, en otras palabras sería el ancho de la losa o losas hasta el borde del hormigón. Esta distancia se introduce en metros

### **Porcentaje de Resistencia a la Tracción**

Es el coeficiente de seguridad que reduce la tensión del acero para evitar la aparición de fluencia en el mismo y por tanto la apertura de la junta longitudinal, este valor típicamente es de 75%, sin embargo podría variarse en función a la mayor o menor seguridad que se desee.

### **Separación entre barras de amarre**

Como un primer resultado, se determina el espaciamiento entre barras de amarre en base al espesor de la losa, calidad del acero y el diámetro de la barra de amarre. El peso específico

del hormigón se asume como 2,300 Kg/m<sup>3</sup>. Si se desea usar un peso unitario diferente de 2300 kg/ m<sup>3</sup>, aplique la siguiente corrección:

$$As_{(nuevo)} = As_{(calc)} \times \text{Peso Unitario Nuevo [Kg/m3]} / 2,300 \quad \text{Ec. (4.1)}$$

Sin embargo, este valor no tiene una incidencia muy significativa. Por otra parte, se recomienda un espaciamiento máximo de 1.20 m. Adicionalmente, es importante el criterio del diseñador para que se utilice siempre un número entero de barras por losa para que no coincida una barra de amarre en la misma posición de las barras pasajuntas, de modo que el valor de cálculo debe modularse de acuerdo a la longitud de las losas.

### **Longitud de Barras de Amarre**

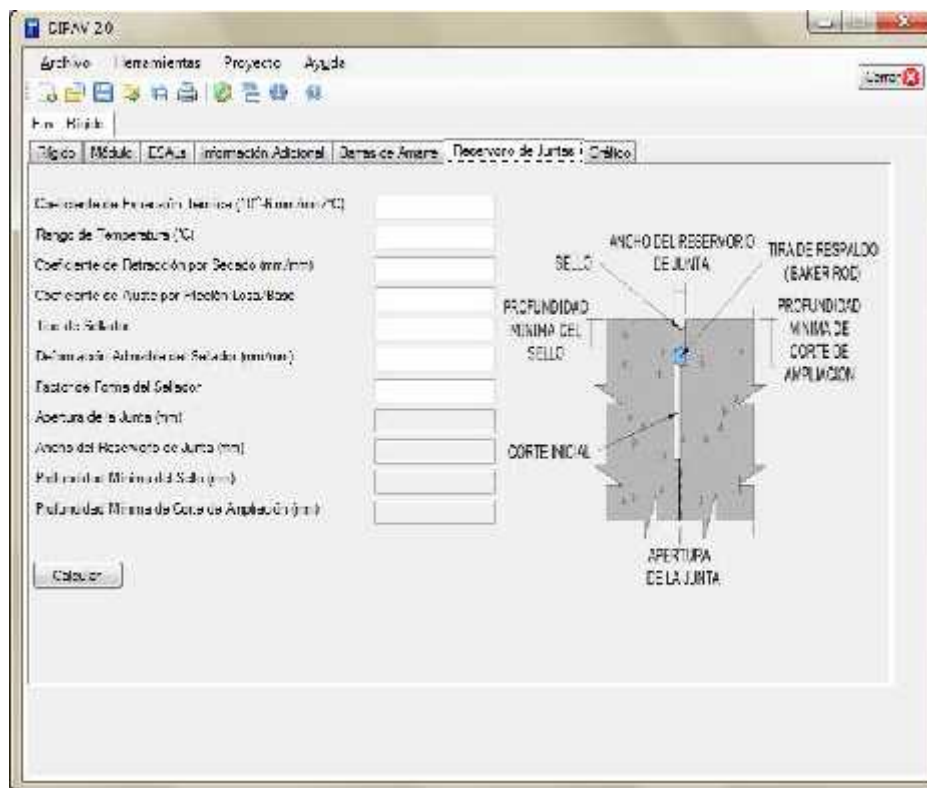
El segundo resultado se determina en función de la longitud de anclaje que requiere la barra para no fallar por deslizamiento, por este motivo para las barras de amarre siempre se utiliza barras corrugadas. La longitud calculada por DIPAV 2.0 es la mínima requerida, de manera que esta debería redondearse a un valor práctico mayor al indicado.

### **b.- Reservorio de la Junta y Diseño de Sellador**

Esta opción permite el diseño del reservorio para alojar el material de sello de la junta transversal que es un elemento muy importante en el diseño de pavimentos rígidos. Un reservorio de junta adecuado ayudará a asegurar el desempeño apropiado del sellador a lo largo de la vida del pavimento.

Los datos que se requieren para dimensionar el reservorio son: el coeficiente de retracción térmica del hormigón, el rango de temperatura estimado desde el momento de la colocación del hormigón a una temperatura mínima promedio, el coeficiente de retracción por secado del hormigón y un factor de fricción losa-base (diferente del coeficiente de rozamiento).

**Figura 4.54. Diseño de reservorio de juntas y sellador**



Las propiedades requeridas son: el material del sellador, su deformación admisible y el factor de forma aplicable, el espaciamiento de juntas transversales (que ha sido introducido en la pestaña **Información Adicional**). A continuación se analizan en detalle estos datos.

Los resultados a obtener serán el ancho mínimo recomendado de la abertura de juntas y la profundidad a la cual se debe colocar el sellador, sin embargo, en algunos casos estos valores pueden ser menores a los mínimos especificados por el fabricante, en este caso deberán usarse estos últimos.

### **Coeficiente de Expansión Térmica del Hormigón**

El coeficiente de expansión térmica del hormigón es una medida del cambio de dimensiones del material cuando está sujeto a variaciones de temperatura. El coeficiente de expansión

térmica depende de factores como la relación agua cemento, la edad del hormigón, el contenido de cemento y la humedad relativa del ambiente, sin embargo, el tipo de agregado grueso en la mezcla tiene el mayor impacto en este coeficiente. Algunas guías para estimar este valor, en base a diferentes tipos de agregado grueso se presentan a continuación. Debe notarse que este cuadro está bajo revisión y debe usarse con precaución.

**Tabla 4.2. – Coeficiente de expansión térmica en función al tipo de agregado grueso**

Tipo de Agregado Grueso	Coeficiente de Expansión Térmico $10^{-6}$ mm/mm/ $^{\circ}$ C ( $10^{-6}$ pg/pg/ $^{\circ}$ F)
Cuarzo	11.91 (5.6)
Arenisca	11.7 (13.5)
Grava	10.8 (6.0)
Granito	9.5 (5.3)
Basalto	8.6 (4.8)
Caliza	8.8 (3.8)

Fuente: AASHTO Guía de Diseño Parte II. Sección 2.5.2 y Tabla 2.10

### **Rango de Temperatura de Colocación del Hormigón a una Temperatura Mínima**

El rango de temperatura que se requiere para el cálculo de la apertura de juntas es la diferencia entre la temperatura al momento de vaciado del hormigón y la mínima promedio en la zona del proyecto. Este rango permite estimar el acortamiento de la losa.

### **Coeficiente de Retracción por Secado de la Losa de Hormigón**

La retracción del hormigón se debe a la evaporación paulatina del agua de la mezcla, que origina también un cambio en su longitud. Depende del contenido de cemento; los tipos de mezclas y agregados utilizados; el uso de aditivos; el contenido de agua; el método y condiciones de curado y los distintos tipos de agregados, se requiere estimar un valor de retracción a los 28 días. En ausencia de mayores datos, se presenta a continuación un valor de retracción estimado en base al esfuerzo de tensión indirecto, cuyo ensayo se realiza bajo ASTM C 476. Como un valor aproximado, puede considerarse que la resistencia a la tracción indirecta estará en el orden del 86% del módulo de ruptura  $S'c$ .

**Tabla 4.3.- Retracción en función a la resistencia a la tensión indirecta**

Tensión Indirecta 28 días Esfuerzo en KPa (psi)	Retracción, mm/mm o pg/pg
menor a 2,100 (300)	0.0008
2.800(400)	0.0008
3.400(500)	0.00045
4.100(600)	0.0003
mayor a 4.800 (700)	0.0002

Fuente: AASHTO Guía de Diseño Parte I. Sección 2.5.2 y Tabla 2.9.

### **Coefficiente de Ajuste por Fricción entre Losa y Subbase**

Con los valores hasta ahora presentados se podría considerar que la losa puede moverse libremente, sin embargo, al existir una cierta fricción con la capa subyacente, se requiere utilizar un factor de ajuste que considere la restricción al movimiento en la junta transversal. Los valores recomendados son simplemente 0.65 para una base estabilizada (como ser una base tratada con cemento u hormigón pobre), y un valor de 0.80 para una base granular. Ref. Guía de Diseño AASHTO Parte II. Sección 3.3.3.

### **Tipo de Sellador**

Existen tres categorías de materiales para sellar juntas transversales que se pueden especificar: bituminosos; silicona y materiales preformados. Todos los materiales comúnmente usados caen en una de las siguientes categorías:

**Selladores Bituminosos:** Los selladores en base a petróleo son una familia de materiales de sellado, termoplásticos moldeados en la obra, que pueden ser aplicados en caliente o en frío, pueden ser modificados con una variedad de productos, incluyendo fibras, goma y polímeros. Su vida útil está entre 5 a 10 años dependiendo del producto. Deben cumplir con las normas ASTM D1190, D3405, D3406 y D1850.

**Silicona o Poliuretano:** Los selladores de silicona se aplican en frío, son materiales termoajustables que tradicionalmente, han requerido de herramientas después de colocados para lograr una forma adecuada, sin embargo, actualmente existen selladores autonivelantes que no requieren de herramientas para su formado. La durabilidad de este tipo de productos

varía entre 10 a 15 años.

**Selladores Preformados:** Selladores de juntas preformados, fabricados en base a neopreno, goma u otro material sintético, tienen un diseño de sección transversal que mantiene el sellador comprimido en la junta, otros selladores requieren de la aplicación de un pegamento o de un lubricante.

Los selladores de base bituminosa, silicona o poliuretano, se moldean en obra y para el diseño del sellador se requiere conocer su deformación admisible, normalmente se diseñan a la tracción y con este dato se puede determinar el ancho del reservorio de la junta. Con el factor de forma recomendado se puede determinar la profundidad del reservorio.

#### **Deformación Admisible del Sellador.**

La deformación admisible del sellador es un valor especificado por el fabricante y toma en cuenta las características específicas de tracción del material de sello. Esta información normalmente está disponible en las cartillas de cada producto. Un valor típico para un sellador en base a petróleo es de 0.25 y para selladores de silicona o poliuretano es de 0.50. El valor representa el porcentaje al cual se puede elongar el material de sello. Este concepto no es aplicable a selladores preformados puesto que ellos se introducen comprimidos dentro de la junta. Ref. Guía de Diseño AASHTO Parte II. Sección 3.3.3.

#### **Factor de Forma del Sellador.**

Es la relación recomendable entre la profundidad y el ancho y (P/A) del sellador. Para selladores en base a petróleo esta relación varía entre 1:1 hasta 2:1, es decir que la profundidad dentro de la caja del sellador puede variar entre una a dos veces el ancho. Para selladores de silicona o poliuretano, estos valores varían en función del fabricante siendo la más común de 1:2. Este factor debe ser introducido en el programa como un decimal (0.5 para un factor de forma de 1:2). Es importante revisar siempre la cartilla de recomendaciones del fabricante, puesto que existen valores mínimos recomendados tanto para el ancho así como para el espesor. Otros productos también cuentan con factores de forma recomendados por el fabricante.

**Apertura de la junta**

La apertura calculada de la junta corresponde al valor máximo esperado en una junta de contracción que ocurre a la temperatura mínima promedio, de acuerdo con la Guía de Diseño AASHTO Parte II. Sección 3.3.3. Ese valor de la apertura se utiliza para determinar el ancho requerido del reservorio del sellador.

**Ancho del Reservorio de Junta**

El ancho mínimo recomendado para el reservorio de la junta es una función de la apertura calculada de la junta y de la deformación admisible para un sellador específico. Se calcula al dividir la apertura de la junta entre la deformación admisible del sellador.

**Espesor mínimo del sello**

Es el espesor mínimo calculado en la parte central del sellador, es decir que en ningún lugar del reservorio debería existir un espesor menor. Este valor se calcula al multiplicar el ancho del reservorio de la junta por el factor de forma del sellador. Es importante referirse a las especificaciones del proveedor del material ya que, especialmente cuando se utilizan juntas próximas los valores mínimos recomendados pueden resultar mayores a los calculados.

Usualmente el ancho mínimo para la apertura de juntas es de 6mm.

**Profundidad Mínima del Sello**

Se refiere a la profundidad que debe tener el material del sello en la parte central de la junta. Este valor se calcula mediante el factor de forma y se refiere únicamente al material del sello de juntas.

Cuanto se utilizan espaciamientos cortos y bajos rangos de temperatura, tanto la apertura como la profundidad pueden estar fuera de los límites prácticos, por este motivo es importante revisar las recomendaciones de los fabricantes antes de adoptar un valor.

**Profundidad Mínima de Corte de Ampliación**

Se refiere a la profundidad total de ampliación para alojar el material del sello de juntas y la

tira de respaldo denominada en inglés “backer rod”. Esta tira de respaldo, de sección circular es un material fácilmente compresible que permite reducir el volumen de sellador requerido evitando que éste se adhiera a la parte inferior, de manera que el sello trabaje únicamente a tracción o compresión.

Cabe aclarar que inicialmente se realiza un corte de plano de debilitamiento para inducir la fisuración por debajo de la junta transversal, este corte debe realizarse a 1/3 del espesor de la losa, sin embargo, para alojar el material de sello, se debe realizar un corte de ampliación que contemple el ancho calculado del sellador y una profundidad en la que se establezca tanto el espesor de ampliación así como el diámetro de la tira de respaldo (backer rod). En función del ancho, DIPAV calcula un diámetro de la tira de respaldo algo mayor que el ancho calculado, de manera que este elemento no se mueva dentro de la junta. Adicionalmente, es necesario considerar que el sello debería estar remetido dentro de la junta en al menos 3 mm en la parte central para protegerlo del tráfico vehicular.

Puesto que los selladores deben desplazarse 3 mm, este valor se añade al cálculo para la profundidad del sellador, de este modo, para juntas transversales, la profundidad mínima es de 12.5mm y para juntas longitudinales 9.5 mm. La profundidad sugerida por DIPAV es la mínima requerida y el diseñador debe hacer un ajuste por razones prácticas en función del diámetro de tira de respaldo disponible y la ovalización que ésta pueda presentar. Ref. AASHTO Guía de Diseño Parte II. Sección 3.3.3

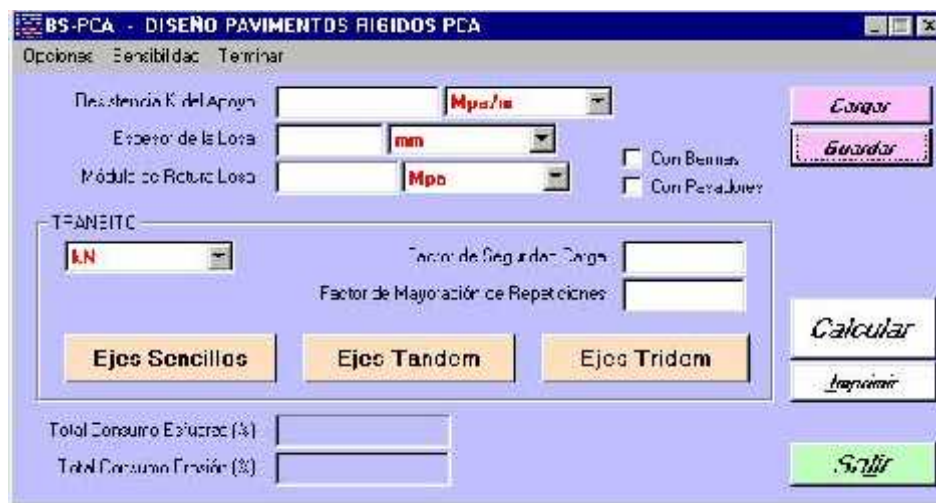
#### 4.2.2.2.- Metodos Mecanicistas

##### 4.2.2.2.1.- BS PCA

Introduciendo los datos de entrada requeridos, el programa permite calcular los consumos de fatiga (esfuerzo) y erosión haciendo click en el botón



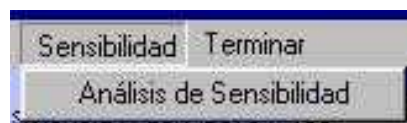
Figura 4.55.- Interfaz principal del programa BS PCA



**Análisis de Sensibilidad.**- Un análisis de sensibilidad tiene como finalidad evaluar el impacto que los datos de entrada o de las restricciones especificadas a un modelo definido, tienen en el resultado final o en las variables de salida del modelo.

Con el programa BS-PCA se podrán realizar análisis de sensibilidad, con el fin de poder optimizar el diseño del pavimento.

Para realizarlo se deberá ejecutar la opción Sensibilidad/Análisis de Sensibilidad del menú del programa.



Para realizar un análisis de sensibilidad con el programa se requerirá de la siguiente información:

**Figura 4.56.- Analisis de Sensibilidad**

	Unidad	Inicial	Final	Paso
Resistencia K del Apoyo	Mpa/m	20	180	10
Espesor de la Losa	mm	100	350	10
Módulo de Rotura de la Losa	Mpa	4	5	2
Factor Mayoración de Repeticiones		1	100	5

Con Bermas  
 Con Pasadores

Total Consumo Esfuerzo (%) **53.1891**

**Rango de Resistencias del Apoyo a Analizar:** Valores inicial y final de los valores K del apoyo a ser procesados por el sistema.

**Rango de Espesores a Analizar:** Valores inicial y final de los valores de espesores de pavimento a ser analizados por el sistema.

**Módulo de Rotura de la Losa:** Valores inicial y final de los valores de los módulos de rotura de la losa a ser analizados por el sistema.

**Factores de Mayoración las Repeticiones de Carga:** Valores inicial y final de los factores de Mayoración a incluir en el análisis.

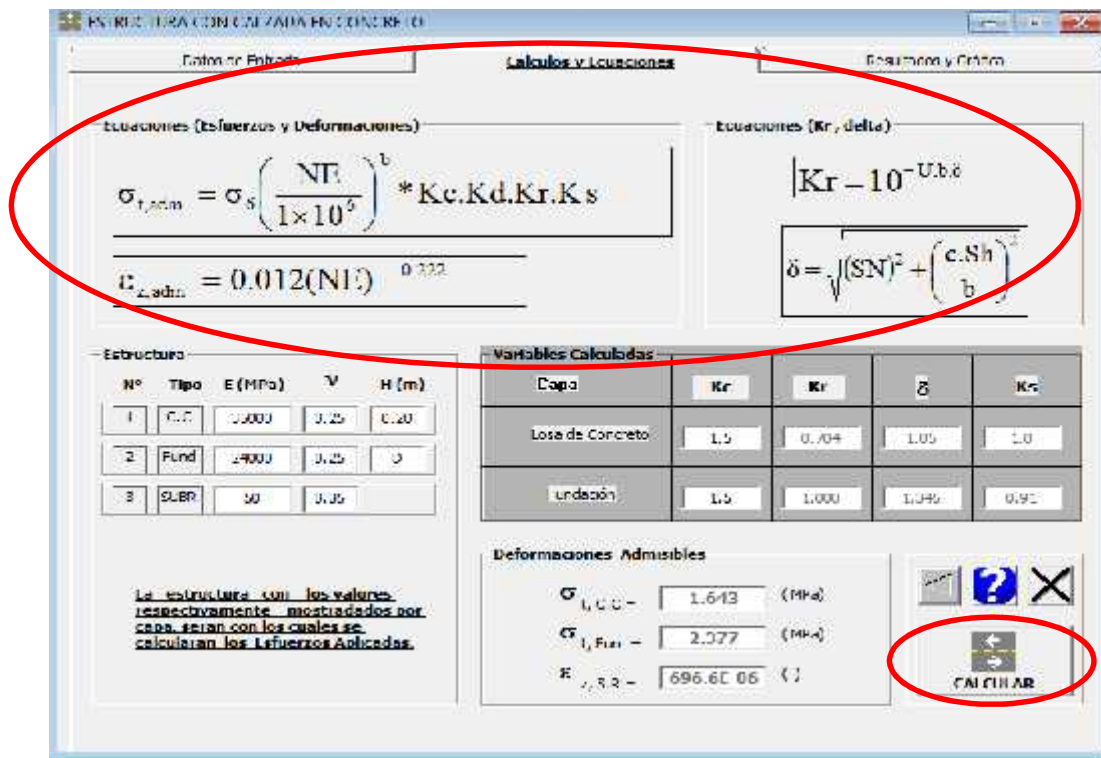
Para el análisis de sensibilidad se podrá seleccionar si el pavimento tendrá bermas y/o pasadores.

#### 4.2.2.2.2.- KENPAV

Introduciendo los datos de entrada requeridos, el programa permite calcular los esfuerzos admisibles haciendo click en el botón:



Figura 4.57.- Cálculos y Ecuaciones del Programa KENPAV



El proceso es:

- a. **Variables calculadas.**- Con las ecuaciones en la parte superior.

Capa	Kc	Kr	δ	Ks
Losa de Concreto	1.5	0.704	1.05	1.0
Fundación	1.5	1.000	1.345	0.91

- b. **Deformaciones Admisibles.**- Con las ecuaciones de esfuerzo y deformación.

Deformaciones Admisibles	
$\sigma_{f,C.C.}$	1.643 (MPa)
$\sigma_{f,Fund.}$	2.377 (MPa)
$\epsilon_{s,S.R.}$	696.6E-06 ( )

### 4.2.2.3.- Métodos Empírico-Mecanicistas

#### 4.2.2.3.1.- M-E PDG

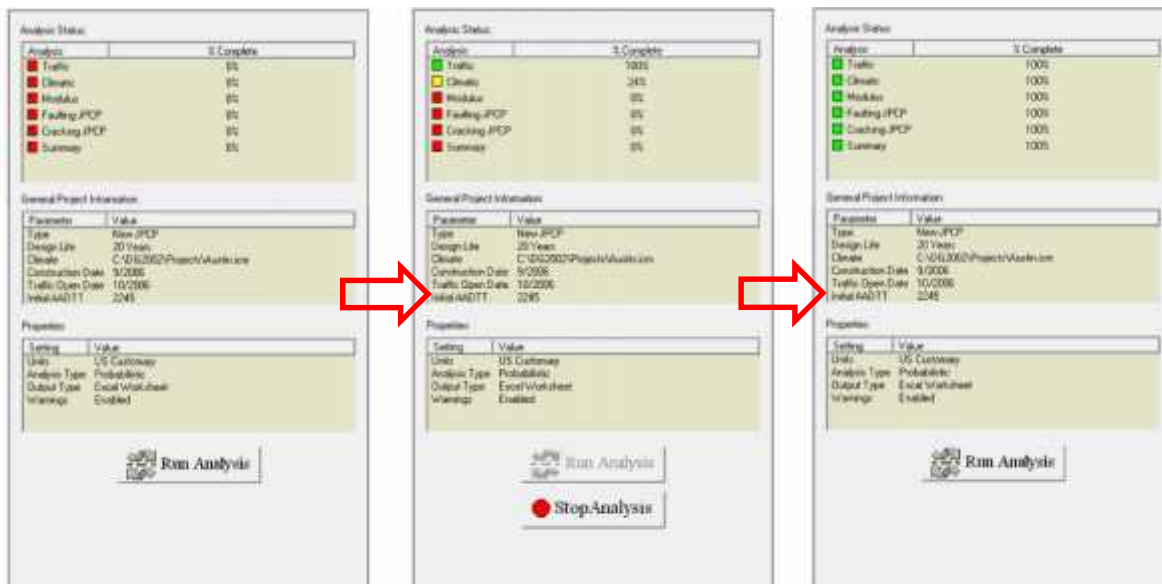
Introduciendo los datos de entrada requeridos, el programa permite hacer un análisis de falla y agrietamiento haciendo click en el botón:



Podemos observar en las siguientes figuras como va analizando las diferentes variables, hasta ejecutarse totalmente el análisis:

- Trafico
- Clima
- Modelos
- Falla
- Agrietamiento
- Informe

**Figura 4.58.- Analisis del Programa M-E PDG**



### 4.2.3.- RESULTADOS

Es el paso en el cual se presentan al usuario el resultado (salida) del procesamiento de datos. Este es igual de importante que los anteriores elementos ya que luego de este paso se toma las decisiones de mayor interés y relevancia, es el momento de comparar y analizar resultados, es el objetivo principal por el cual utilizamos un software.

Estos pueden estar plasmados como un número, palabras, graficas, o cualquier tipo de elemento gráfico, numeral o alfabético.

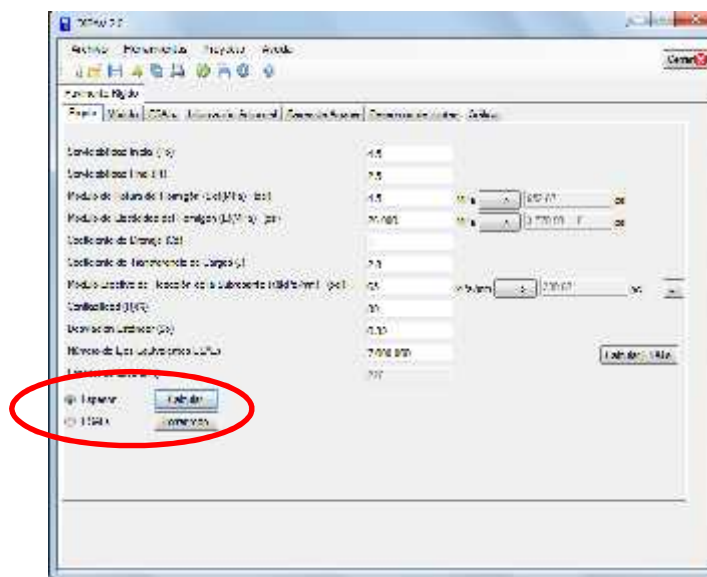
#### 4.2.3.1.- METODOS EMPIRICOS.-

##### 4.2.3.1.1.- DIPAV 2.0

Los resultados se mostrarán en la parte inferior de la pantalla principal del sistema:

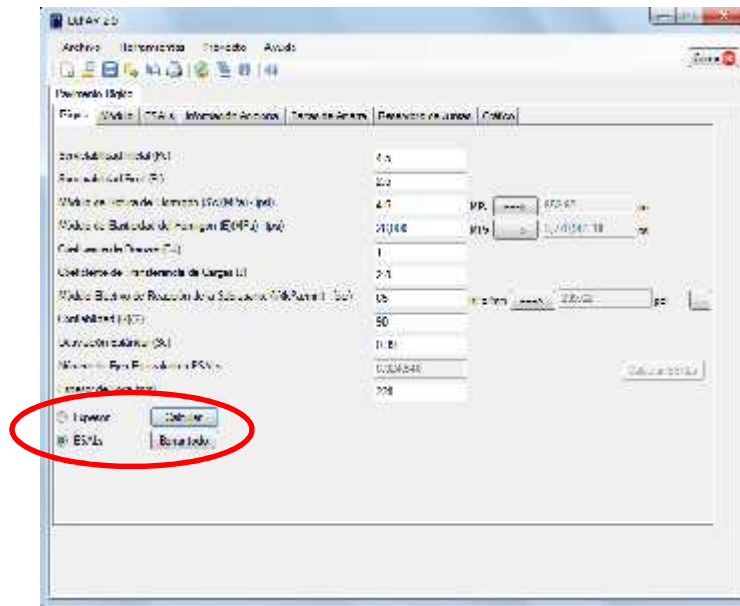
a.- Como primera opción tenemos el espesor de la losa teniendo de dato el número de ejes equivalentes.

**Figura 4.59.- Resultado: Espesor de la losa**




b.- Como segunda opción tenemos el resultado el **número de ejes equivalentes** teniendo de dato del espesor de la losa.

**Figura 4.60.- Resultado: Número de Ejes Equivalentes ESALs**



### Visualización de los resultados de diseño

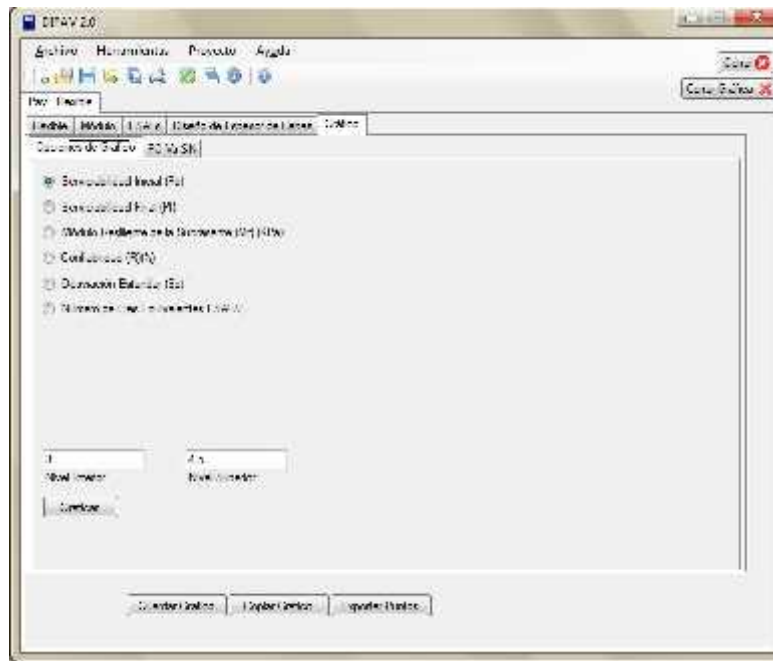
Aparte de la presentación de los resultados en pantalla y la impresión de los mismos o su exportación a archivos de MS-Word o MS-Excel para posterior procesamiento, tanto los módulos de diseño de pavimentos rígidos y flexibles cuentan con Gráficos de Sensibilidad entre espesor de losa (o número estructural) y cada una de las variables de diseño. Para acceder a los gráficos de sensibilidad, se debe hacer clic en la pestaña “**Gráficos**”.

En la pestaña “**Gráficos**” aparece un sub botón **Cerrar Gráfica**  que permite como su nombre lo dice cerrar los gráficos que no nos sirvan y que no necesitemos guardar y/o exportar.

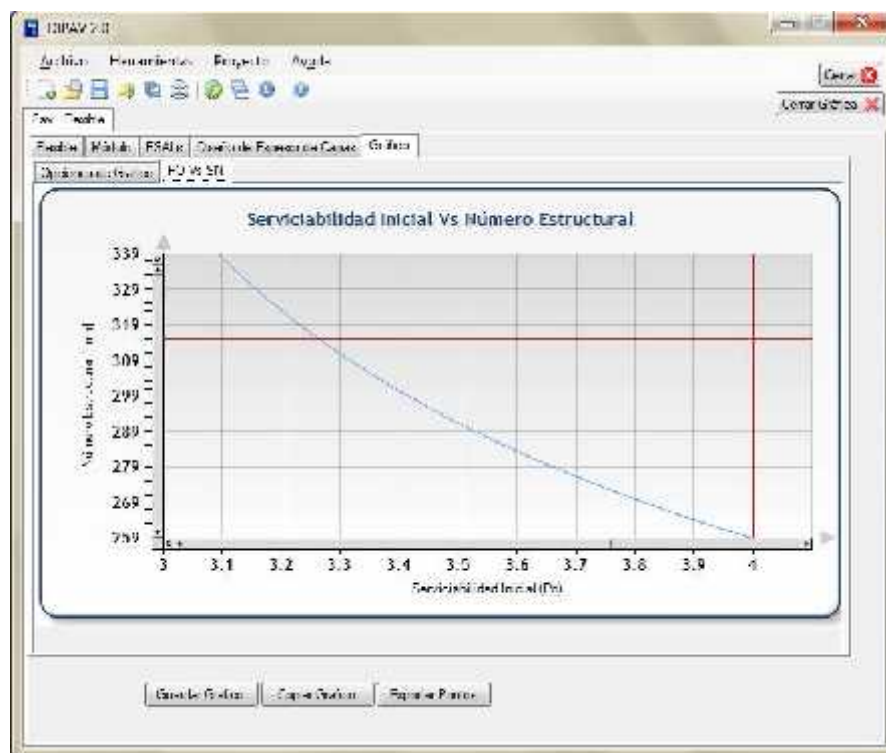
### Gráficos de Sensibilidad.

Una vez en la pestaña **Gráficos** que se muestra en la fig. 3.14, se podrán graficar todas las variables empleadas en el diseño estructural del pavimento vs. El espesor.

**Figura 4.61.- Opciones de gráficos de sensibilidad**



Es necesario seleccionar una de las variables e introducir los rangos en los que desea mostrar la variación en las casillas “*Valor Inferior*” y “*Valor Superior*”. DIPAV 2.0 Graficará la sensibilidad de espesor versus la variable seleccionada en el rango requerido. DIPAV 2.0 revisa que los valores inicial y final estén dentro de los rangos establecidos por la Guía AASHTO para evitar incongruencias. El gráfico terminado puede imprimirse directamente, guardarse o copiarse al portapapeles y pegar en otro programa a elección, adicionalmente, haciendo clic en el botón ***Exportar Puntos*** se exportan a una Hoja de Excel los valores de la gráfica para poder crear gráficas personalizadas. Estos gráficos pueden ser muy útiles para la verificación en obra de determinadas variables que puedan estar unas por encima y otras por debajo de los valores especificados y permitirían analizar el probable desempeño de un pavimento en comparación con los datos originales de diseño.

**Figura 4.62.- Función Zoom para los gráficos.**

#### 4.2.3.2.- Métodos Mecanicistas

##### 4.2.3.2.1.- BS PCA

Los resultados se mostrarán en la parte inferior de la pantalla principal del sistema:

**Figura 4.63.- interfaz principal del programa BS PCA**

Total Consumo Esfuerzo (%) :	53.1891
Total Consumo Erosión (%) :	29.5886

El total de consumo de esfuerzo y erosión debe ser próximos pero menores a 100 %.

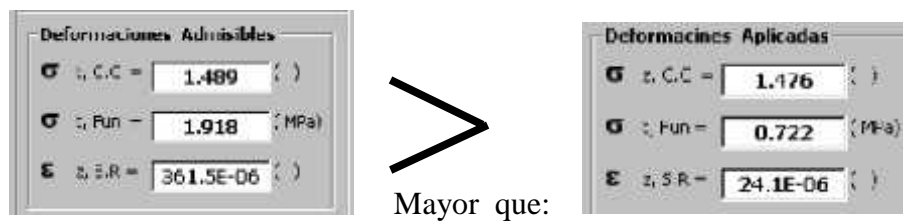
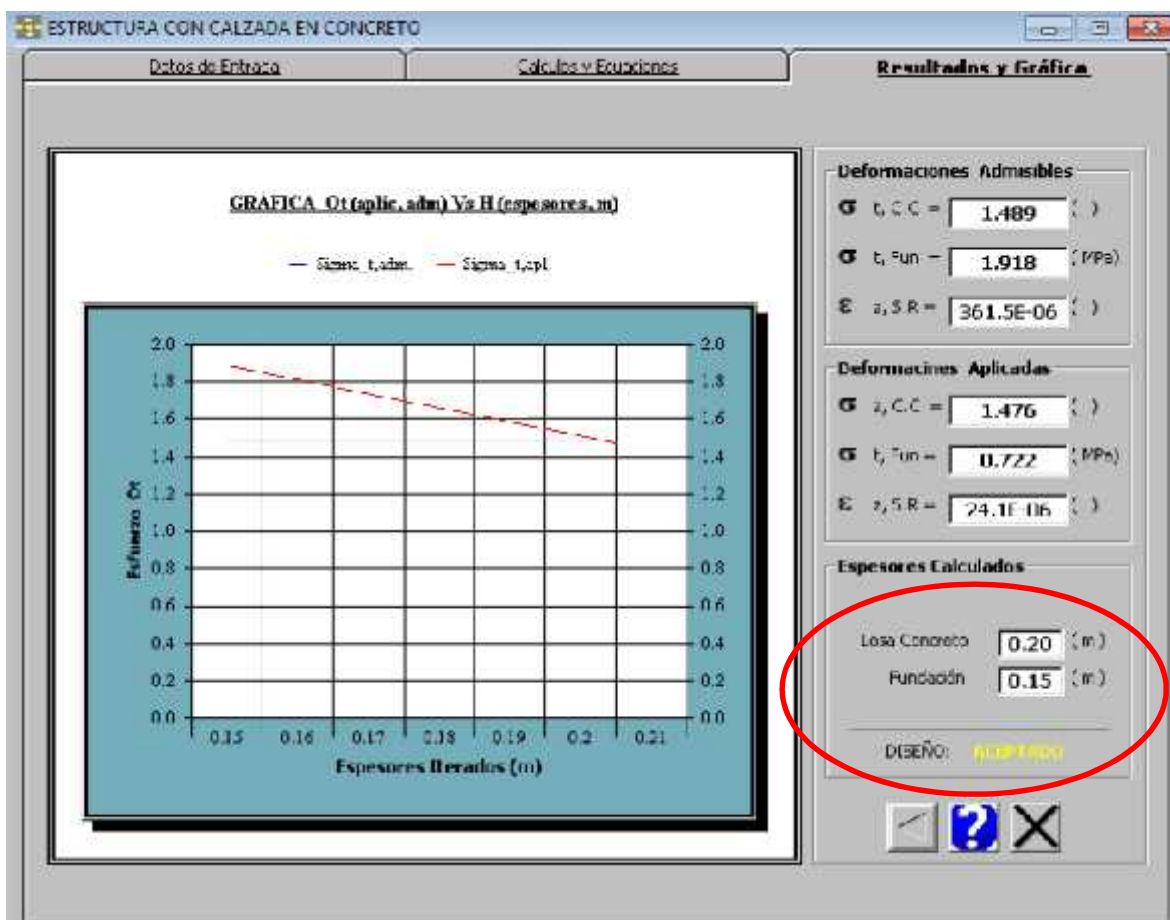
Los resultados se podrán imprimir en papel haciendo click en el botón.



#### 4.2.3.2.2.- KENPAV

Los resultados se mostrarán en la parte inferior de la pantalla principal del sistema:

**Figura 4.64.- Resultados y Grafica del programa KENPAV**



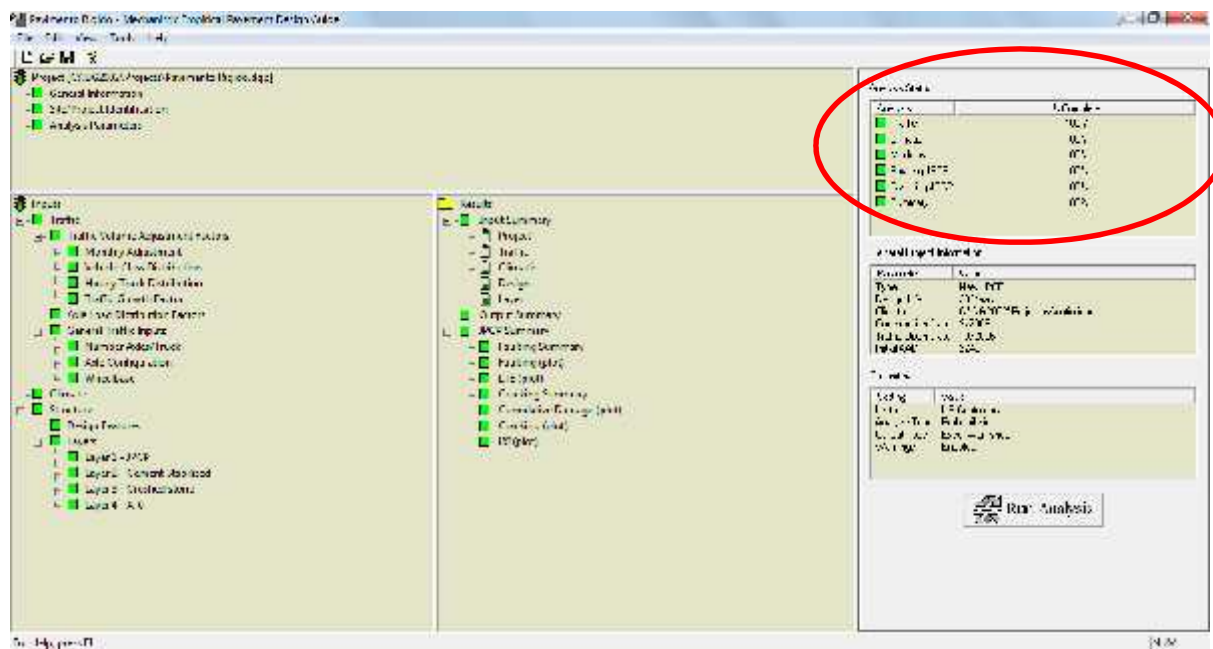
El cual nos indica que el diseño es aceptado.

### 4.2.3.3.- Métodos Empírico-Mecanicistas

#### 4.2.3.3.1.- M-E PDG

Los resultados se mostrarán en un informe que se crea en un documento de Microsoft Excel, luego de haber ejecutado el análisis.

**Figura 4.65.- Datos completos y proceso finalizado del programa M-E PDG**



El programa nos hace un informe de todos los datos de entrada, procesamiento de datos y resultados en gráficas, todo esto en un documento Excel. Los resultados son los siguientes:

Figura 4.66.- Predicción de Fallas Vs Edad de Pavimento

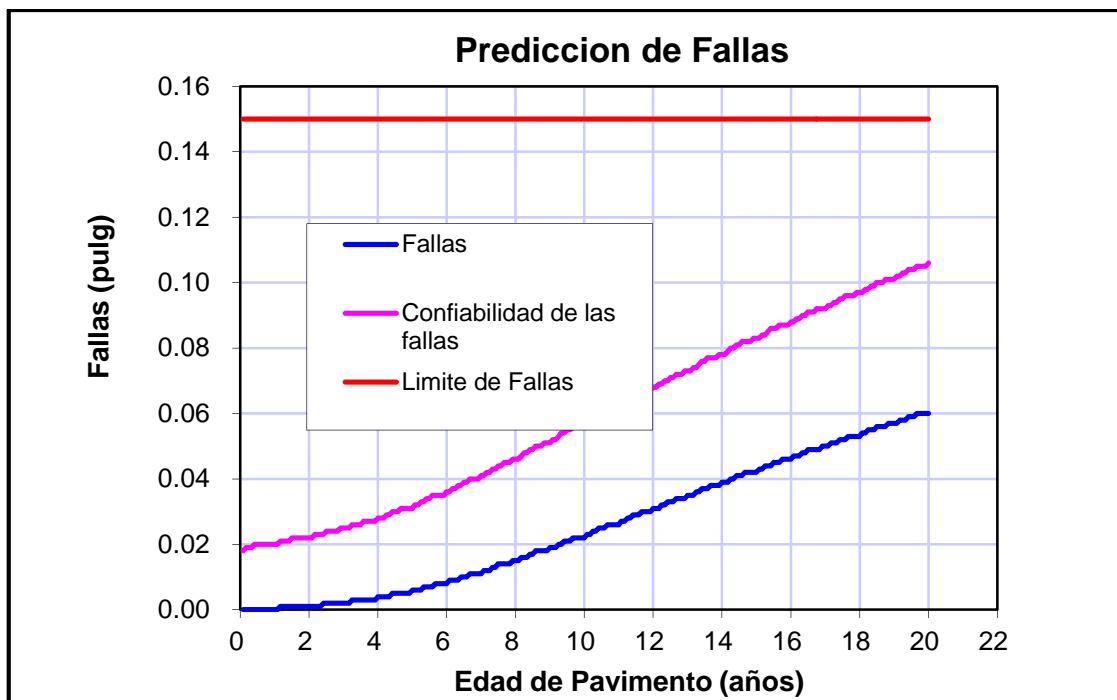


Figura 4.67.- Eficiencia de Transferencia Vs Edad de Pavimento

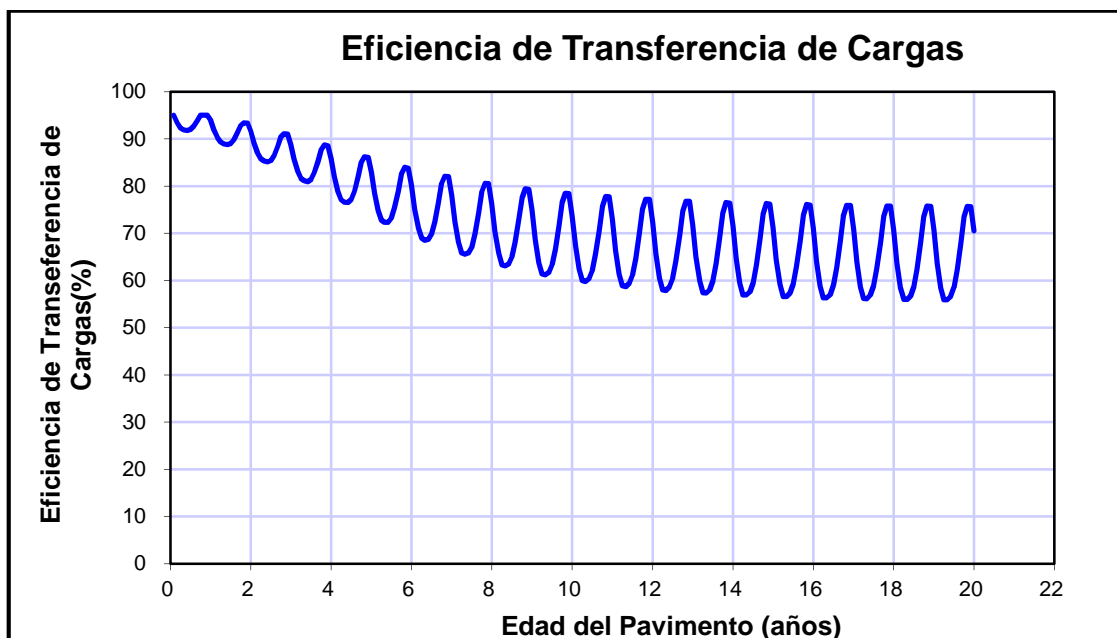


Figura 4.68.- Porcentaje de Agrietamiento de Losa Vs Edad de Pavimento

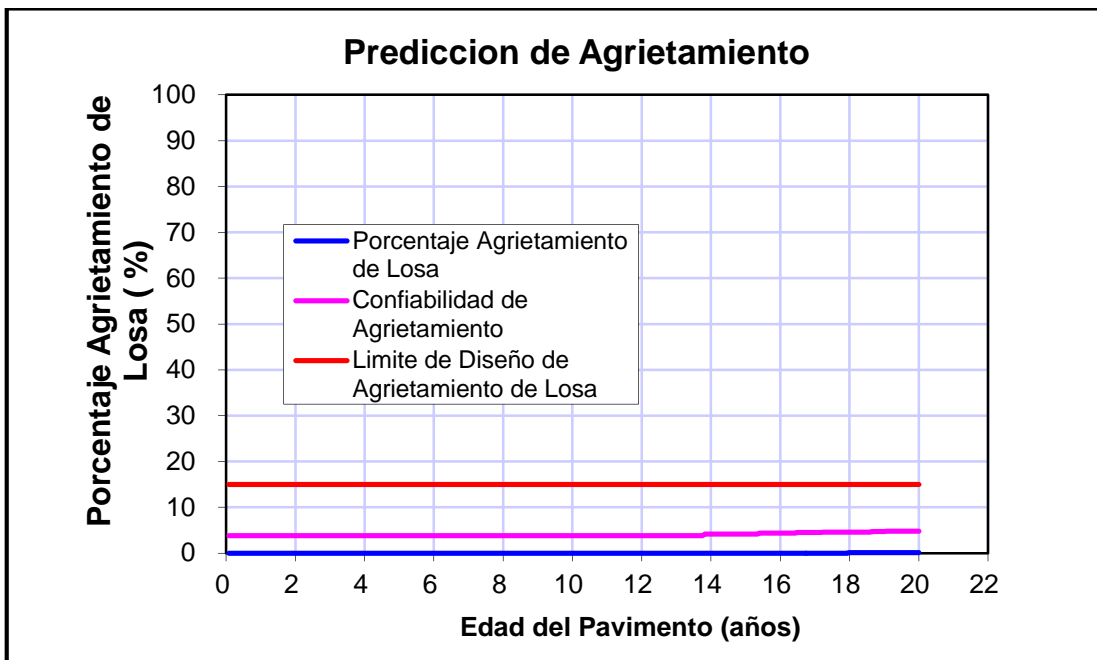
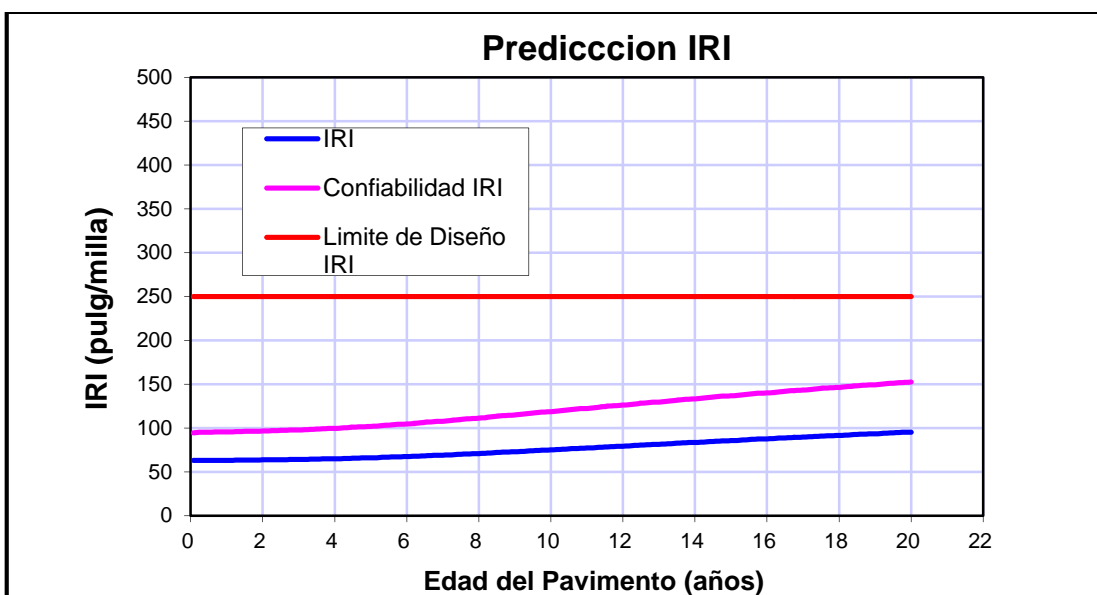


Figura 4.69.- Predicción IRI Vs Edad de Pavimento



### 5.- Cuadro Comparativo de las Ventajas y Desventajas entre los Métodos

<b>METODOLOGIAS</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>EMPIRICOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resultado de décadas de investigación desde 1960 (ecuación general AASHTO 93)</li> <li>- Mayor número de datos tráfico y estadísticos.</li> <li>- Calcula Tráfico (ESALs) o Espesor de la Losa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Datos de clima Indirectos (Coeficiente de Drenaje)</li> <li>- No analiza los daños durante la vida útil del pavimento.</li> </ul>
<b>MECANICISTAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor énfasis en datos de entrada estructurales.</li> <li>- Análisis y Comparación de Deformación y Esfuerzo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Datos de Clima Indirecto (Análisis de Erosión)</li> <li>- Menor Número de Datos de Entrada</li> <li>- No toma en cuenta la geometría del pavimento.</li> <li>- No analiza los daños durante la vida útil del pavimento.</li> </ul>
<b>EMPIRICO-MECANICISTAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Datos de entrada de tipo, tráfico y estructurales específicos.</li> <li>- Predice fallas a lo largo de la vida útil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Datos del clima de una ciudad de los EE UU.</li> <li>- Datos de Tráfico de una ciudad de los EE UU.</li> </ul>

## **CAPÍTULO V**

### **APLICACIÓN PRÁCTICA**

#### **5.1.- Ubicación del área de influencia del estudio.**

El área de influencia del estudio de este proyecto está definida de forma específica y su nombre es:

- Diseño de pavimento rígido – 150 calles de la ciudad de Bermejo

#### **5.1.1.- Ubicación del área de influencia del proyecto.**

##### **Proyecto “Diseño de pavimento rígido 150 cuadras de la ciudad de Bermejo”**

El área que comprende este proyecto está ubicada en la ciudad de **Bermejo**, perteneciente a la provincia Aniceto Arce, ubicada en el departamento de Tarija. Su nombre original es Pozo del Bermejo. Tiene 26.059 hab. y está a 208 km de la ciudad de Tarija, en la frontera con la República Argentina.

Limita al Norte con la serranía de San Telmo (río Tarija) y Colonia Ismael Montes, al Sur con el río Bermejo y la República Argentina; al Este con el río Grande de Tarija y la República Argentina, al Oeste con la comunidad de San Telmo (río Bermejo) y la República Argentina.

Pertenece a la provincia de Aniceto Arce del departamento de Tarija, la misma que se encuentra ubicada en el extremo sur del departamento, entre las coordenadas geográficas 22° 35' 24" y 22° 52' 09" de Latitud Sur y 64° 26' 30" y 64° 14' 55" de Longitud Oeste (22°35'24 S 64°14'55 O).

La ciudad es conocida por el ingenio azucarero que se encuentra en esta ciudad, y que provee una buena parte del consumo interno de azúcar de Bolivia. También es importante en Bermejo una planta procesadora de cítricos.

**Figura 5.1.- Mapa Político de Bolivia**



**Figura 5.2.- Mapa Político de Tarija**



**Figura 5.3.- Imagen Satelital de la Ciudad de Bermejo**



## **5.2.- Características del proyecto en el estudio**

### **Población**

Por su ubicación geográfica, Bermejo se cataloga como ciudad de frontera, caracterizada por un dinámico crecimiento, pero también por una fuerte inestabilidad del mismo. Cuenta con un alto porcentaje de población flotante. Según el "Censo 2001", tiene 34.937 hab., de los que 16.956 son mujeres y 17.981 son varones. Se tiene proyectado en la gestión 2005, un total de 37.300 habitantes, de los que 17.993 serían mujeres y 19.307 varones (Fuente INE). No se dispone de datos de población con discapacidad.

La densidad demográfica calculada por el I.N.E. (Instituto Nacional de Estadísticas - boliviano-) es de 87,45 hab./km El 43,2% de su población es clasificada como pobre, el 31% se encuentra en el rango de pobreza moderada, el 6% en la indigencia y no existiría población en estado de marginalidad.

La mayor parte de la población ocupada se encuentra en el sector agropecuario (23%), seguido de los trabajadores de los servicios y vendedores del comercio (22%). Los trabajadores no calificados son el 17% y los de la industria extractiva, construcción y manufactura el 16%.

### **Clima y temperatura**

Bermejo se encuentra situado a una altura de 415 msnm, con una temperatura media anual de 22,53 °C; sin embargo, el clima de Bermejo se caracteriza por tener temperaturas extremas: muy altas entre septiembre a mayo, llegando a alcanzar los 45 °C, mientras que entre junio a agosto las temperaturas descienden hasta los 10°.

Los meses de lluvias se concentran entre marzo y mayo, por lo que existe un alto grado de humedad. El período de lluvias empieza en octubre y se extiende hasta abril, con una precipitación anual de 1.323,1 mm. Por otra parte, es una zona con bastante vegetación, fauna y flora.

**Precipitación pluvial.-**

Se encuentra a 419 msnm, de clima tropical, con una media de 22,18 °C y 1.200 mm de precipitación pluvial concentrados en el periodo de lluvias (noviembre-abril).

**Alcance.-**

El proyecto Pavimentación de 150 cuadras de la ciudad de Bermejo se ubica dentro de la misma ciudad abarcando una cantidad de 169 cuadras que hacen una cantidad de 234000 m<sup>2</sup>.

**Determinación del tráfico de diseño.-**

Para determinar el tráfico actual en las vías urbanas de la ciudad de Bermejo que están en el área de proyecto del presente estudio, en la cual se desarrollaron aforos ubicando para ello distintas estaciones dentro del área de proyecto.

Si bien los aforos de tráfico permiten conocer el TPD, para los estudios de transporte, se debe determinar el tráfico representativo anual, lo que se conoce con el nombre de Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA); para lo que se debe tomar en cuenta las variaciones del flujo vehicular a lo largo del año; esto se obtiene afectando el TPD con el factor estacional mensual (FEM) correspondiente al mes en que se realizó la encuesta.

**a) Factor Estacional**

El factor estacional para cada mes es obtenido dividiendo el volumen mensual (ambos sentidos) de cada mes por el Promedio de todo el año. Luego, conociendo el volumen aforado en algún mes es posible determinar el TPD afectando a ellos el factor del mes respectivo; para el caso del presente estudio el factor que interesa es el que corresponde al mes más crítico que sería de la zafra donde el coeficiente utilizado en el proyecto Bermejo-Los Ingenios es de 0.9663

## b) Determinación del TPDA

Para determinar el TPD se aplica el factor estacional anterior, con estas consideraciones se ha preparado el siguiente cuadro donde se muestran los valores de los aforos, el factor de expansión y, el TPD para la época actual y la estación crítica asignado al conjunto de vías urbanas de este estudio. Estos valores (veh/día) representan al Tráfico Normal en las vías urbanas, que circula y circulará posteriormente exista o no una mejora en la condición de la vía

De acuerdo a los aforos obtenidos:

TPD MAXIMO= 124 VEH/DIA

La composición vehicular muestra en el calles urbanas de referencia de la ciudad de Bermejo hay una predominancia de los vehículos livianos, vagonetas y micros, que, circulan por las calles de la ciudad y en el caso del tramo Bermejo-Los Ingenios que inicia en la Av. Bolivar existe predominancia de equipo pesado cuyos datos corresponde a una época de zafra.

**Tabla 5.1.-Tráfico Promedio Diario 2011  
Vías Urbanas de Bermejo**

VIA CRITICA	TPD	FEM	TPDA
La Paz - Buch	124	0.9663	120

Fuente: Proyecto 150 cuadras de Bermejo

Para la determinación del tráfico de diseño se debe considerar que el crecimiento de las actividades de la región, imputables al proyecto afectará los valores TPDA de los tramos en que se ha dividido el proyecto, entonces corresponde determinar la forma y magnitud en que estos serán afectados mediante la elaboración de “proyecciones”.

Una proyección es una estimación de un cambio futuro, estas se realizan sobre la base de suposiciones de permanencia de tendencias y factores no controlables como son los siguientes:

- El crecimiento histórico del TPDA.

- El crecimiento de la población.
- El crecimiento del consumo de los combustibles
- El crecimiento del parque automotor.
- El producto interno bruto.

El estudio hace un análisis de cada uno de estos factores explicando su crecimiento y su relación con el crecimiento de los volúmenes de tráfico.

El producto interno bruto PIB tiene estrecha relación con los volúmenes de tráfico porque está relacionado con la producción y se refleja en el transporte de carga que se traduce en número de camiones.

El crecimiento de la población, también está íntimamente ligado con el crecimiento de los volúmenes de tráfico por lo que este parámetro interviene para la proyección del Tráfico Normal.

Las tasas de crecimiento promedio utilizadas para la proyección del tráfico se presentan a continuación en la Tabla.

**Tabla 5.1.-Tasa de Crecimiento Promedio**

<b>Factores</b>	<b>Local (%)</b>	<b>Nacional (%)</b>
Consumo anual de diesel	2,25	6,05
Consumo anual de gasolina	2,1	4,15
Consumo anual de combustibles	3,035	3,29
Parque automotor	7,1	7,79
Numero de vehículos-km-año	5,3	12,12
Producto Interno Bruto	4,2	4,75
<b>Tasa Adoptada</b>	<b>7,1</b>	

Fuente: Proyecto 150 cuadras - Plan Maestro de Transportes

Basándose en este conjunto de variables económicas se ha encontrada una tasa anual de 7.1%, que se utilizó para proyectar el TPDA para el horizonte del proyecto, tomando como base el dato de TPD del año 2011.

**Volumen y características del tráfico:** Las proyecciones del tráfico vehicular calculadas en base del estudio de tráfico realizado el mes de enero/2012, han establecido los volúmenes de tráfico mostrados en la Tabla

**Tabla 5.1.- Proyecciones del TPD**

<b>AÑO</b>	<b>NORMAL</b>	<b>GENERADO</b>	<b>DERIVADO</b>	<b>TOTAL</b>
2011	124	37	25	186
2012	133	40	27	200
2013	142	43	28	213
2014	153	46	31	230
2015	164	49	33	246
2016	176	53	35	264
2017	188	56	38	282
2018	202	61	40	303
2019	216	65	43	324
2020	232	70	46	348
2021	249	75	50	374
2022	266	80	53	399
2023	286	86	57	429
2024	306	92	61	459
2025	328	98	66	492
2026	352	106	70	528
2027	377	113	75	566
2028	404	121	81	606
2029	433	130	87	650
2030	465	140	93	698
2031	498	149	100	747
Compos. (%)	100			

Fuente: Proyecto 150 cuadras de bermejo

Como se puede apreciar, los valores de tráfico presentan un incremento anual importante en general aunque se tomo para esta proyección el volumen máximo dado en la intersección de la calle La Paz – German Buch, siendo el resto de las calles de menor volumen de tráfico Tomando en cuenta las características de la composición del tráfico vehicular probable en el período de vida útil del proyecto, de acuerdo al estudio realizado en enero de 2012 se aprecia que el porcentaje de vehículos livianos alcanza un 78% , medianos un 19% y pesados un 3%, pero considerando la variación estacional consideramos que la época más crítica es la época de la zafra donde se incrementa el porcentaje de vehículos pesados, por tal razón se considero la referencia que se tiene

del estudio de Bermejo – Los Ingenios donde se establece la siguiente relación de porcentajes de la composición del tráfico. El porcentaje de vehículos livianos y medianos es de 73,74%, Buses 6,92%, camiones 17,77% y Otros pesados de 1,57% ,los vehículos livianos serán el componente mayoritario de las vías urbanas, en contraste con la composición de carreteras, donde los buses y camiones constituyen el componente mayoritario del tráfico vehicular. Esta diferencia es lógica ya que el conjunto del parque automotor en las ciudades tiene un alto porcentaje de vehículos livianos y medianos.

**Tabla N° 5.2.- Composición Vehicular**

Vehículos	Porcentaje
Livianos y Medianos	73.74%
Buses	6.92%
Camiones	17,77%
Otros pesados	1.57%

La composición arriba descrita se ha estimado como el resultado probable a futuro más crítico para las vías urbanas a ser pavimentadas de la zona de influencia directa del proyecto.

**Tabla 5.1.- Determinación de Ejes Equivalentes**

**Pavimento de Hormigón**

Composición de tráfico vehicular	Livianos		Buses			Camiones				Otros	Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Distribución	<b>Composición Vehicular (%)</b>										
	78.81%		6.92%			5.89%	7.18%	4.78%	1.52%	0.05%	100.00%
	73.74%		6.92%			17.77				1.57%	
<b>Pavimento Rígido</b>			<b>Pf = 2.5 e = 20 cm (8")</b>			<b>Total vehíc. 5.543.100</b>		<b>Período de diseño (años) = 20</b>			
<b>Factores Equivalentes Vehiculares</b>	No se considera		0.0007672			0.5298	4.4894	4.3383	7.5807		<b>Total</b>
<b>Total Vehículos</b>			289			170.165	1.757.746	1.130.813	649.011		
<b>Ejes Acumulados</b>											
										<b>Total (un carril)</b>	<b>1.854.012</b>

Fuente: Proyecto 150 cuadras de Bermejo

La **velocidad directriz** está actualmente restringida por las condiciones de operación de la vía urbana, tanto en geometría horizontal como en pendientes. Las velocidades promedio de operación actuales varían entre 27 km/h para vehículos livianos y 20 km/h para camiones dentro de las vías del área de estudio. Estos valores podrían incrementarse con la pavimentación; sin embargo, algunas condiciones físicas de la vía existente y los factores externos como peatones, transporte público, comercio, etc., han obligado a limitar la velocidad de diseño en **30 Km/h**.

**Para desarrollar el presente diseño se tomaron las siguientes consideraciones:**

Se adjunta el diseño del pavimento con bermas de asfalto no vinculadas, es decir para un ancho de plataforma de 7.00 m. La berma debe ser construida con tratamiento superficial.

Las juntas transversales deben ser aserradas en sitio hasta una profundidad de un tercio de la losa en un ancho de 5.0 mm y a una profundidad de 20mm. Se recomienda el uso de una tira de respaldo (backer rod de 8 mm) y un sellador en base a silicona.

- Diseño de hormigón para un ancho de 3.50 m.
- La distancia entre juntas transversales es de 4.50 m (losa de dimensiones 3.50 por 4.50 m).
- En las juntas transversales deberá colocarse fierro liso de 1" de 0.45 m de largo y espaciado a 0.30 m.
- Las juntas deberán ser aserradas y rellenadas posteriormente con silicona o similar.
- El módulo de ruptura del hormigón a los 28 días es de 4.50 Mpa.
- El módulo k adoptado corresponde a un suelo estable con 4.5 de CBR.
- Las unidades del módulo k están expresadas en kPa/mm.

### 5.3.- Aplicación de las metodologías en estudio con el Proyecto

#### 5.3.1.- Datos de Entrada

##### 5.3.1.1.- Métodos Empíricos

##### 5.3.1.1.1.- AASHTO 1993 – DIPAV 2.0

##### a.- $W_{18}$ = Número Equivalente de Ejes de 80kN (ESAL'S).

El tránsito que circula por una carretera está compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes. A efectos de diseño, este tráfico es transformado en un Número Equivalente de Ejes Tipo de 80 KN. Este número equivalente de ejes transformados se los denomina ESAL'S, “Equivalent Single Axle Load” o carga axial simple equivalente.

Para tener en cuenta estas diferencias, el tránsito es reducido a un número equivalente de ejes de un determinado valor de carga, que producirán el mismo daño que toda la composición de tráfico. Esta carga tipo según AASHTO-97 es de 80 KN o 18,000 libras.

A continuación se muestra el valor que se calculó para el diseño del proyecto:

**Tabla 5.1.- Determinación de Ejes Equivalentes**

Composición de tráfico vehicular	Livianos		Buses			Camiones				Otros	Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Distribución	Composición Vehicular (%)										
	78.81%		6.92%			5.89%	7.18%	4.78%	1.52%	0.05%	100.00%
	75.31%		6.92%			17.77				1.57%	
Pavimento Rígido			Pf = 2.5		e = 20 cm (8")		Total vehíc. = 5.543.100		Período de diseño (años) = 20		
Factores Equivalentes Vehiculares	No se considera		0.0007672			0.5298	4.4894	4.3383	7.5807		Total
Total Vehículos			289			170.165	1.757.746	1.130.813	649.011		
Ejes Acumulados											
										Total (un carril)	1.854.012

Fuente: Proyecto “150 cuadras de la ciudad de Bermejo”

Para el diseño utilizamos un valor de **ESALs= 1.854.012**

### b.- Coeficiente de confiabilidad (R)

Es la probabilidad que la serviciabilidad o desempeño de la vía se mantenga en niveles adecuados para las cargas del tráfico y condiciones ambientales, así como también se mantenga en niveles adecuados desde el punto de vista del usuario durante todo el periodo de diseño. Lo anterior no obstante a que los pavimentos pueden sufrir daños en su estructura debido a las cargas impuestas del tráfico y condiciones ambientales, por lo que deben llevarse a cabo intervenciones que permitan que la vía se comporte en un nivel de operación óptimo.

**TABLA 5.2.- Nivel de Confiabilidad**

Confiabilidad		
Clasificación Funcional	Nivel de Confiabilidad	
	Urbana	Rural
Autopista	85 - 99,9	80 - 99,9
Arteria primaria	80 - 99	75 - 95
Secundaria o Colectora	80 - 95	75 - 95
Local o vecinal	50 - 80	50 - 80

Fuente: Guía de Diseño AASHTO 93

En el presente caso se adopta un valor del **80%**.

La **desviación normal estándar** representa el rango de variación en la predicción del tráfico en el periodo de diseño y depende del nivel de confiabilidad requerido.

La Guía de Diseño AASHTO, en el caso de pavimentos rígidos presenta un rango entre 0.30 a 0.40, sin embargo, recomienda un valor de 0.34 para casos muy confiables y de 0.39 cuando no se tiene estudios muy profundos de tráfico y pesos por eje.

Utilizaremos un valor de **So= 0.35**

### c.- Módulo de reacción de la subrasante–subbase (k)

Puesto que las cargas son transmitidas al suelo de subrasante, las características de soporte del mismo son fundamentales para un adecuado diseño de pavimento rígido.

El módulo de reacción de la subrasante ( $k$ ), es una constante elástica que define la rigidez del material o resistencia a la deformación. Es la relación entre carga por unidad de área de superficie horizontal del suelo con el asentamiento correspondiente de la superficie; este parámetro representa la capacidad portante que posee un suelo en estado natural o con la combinación de una subbase, siendo éste el que servirá para colocar la estructura de pavimento.

En nuestro caso, se dispone de valores de CBR, a partir de los cuales se ha correlacionado el valor de " $k$ ". El espesor de la losa es poco sensible al valor de " $k$ ", puesto que la presión que transmite el pavimento rígido al suelo de fundación es muy baja, de manera que si se duplica el valor de " $k$ ", el espesor se reducirá en aproximadamente 1cm. Por este motivo, no se ha considerado el aporte estructural del terraplén. AASHTO-97 sugiere no considerar el aporte estructural de la base ni el Factor de Pérdida de Soporte, de manera que se ha considerado directamente " $k$ " de la subrasante en base a los CBR correspondientes a la subrasante natural con un 95% de compactación.

Los resultados de laboratorio presentados por el consultor arroja un valor de **38 kPa/mm** con un valor de CBR= 4.5%

#### **d.- Pérdida de serviciabilidad ( $PSI = P_0 - P_t$ )**

La serviciabilidad se define como la capacidad del pavimento de desempeñarse adecuadamente ante todo tipo de tráfico que circula en la vía, se mide en una escala del 0 al 5, en donde 0 (cero) significa pavimento intransitable y 5 significa pavimento en excelentes condiciones. Este factor es una medida subjetiva de la calificación del pavimento; sin embargo, la tendencia es definirla usando parámetros como el índice de regularidad internacional (IRI).

La serviciabilidad inicial ( $P_0$ ) es la condición de un pavimento inmediatamente después de la construcción de éste. La guía AASHTO recomienda para pavimentos rígidos un  $P_0 = 4.5$ , mediante el uso de adecuadas técnicas de construcción. La serviciabilidad final ( $P_t$ ) es la capacidad funcional que se espera tenga un pavimento al final del

periodo de diseño. La AASHTO sugiere que para carreteras principales se utilice un valor de  $P_t = 2.5$  ó  $3.0$  y para carreteras de bajo nivel un valor de serviciabilidad final de  $2.0$ .

Volumen Alto ( $>10.000$ TPDA)	3.0-3.5
Volumen Medio ( $3,000 - 10,000$ TPDA)	2.5-3.0
Bajo Volumen ( $< 3,000$ TPDA)	2.0-2.5

Los valores adoptados son  **$P_o=4.5$ ,  $P_t= 2.5$**

#### **e.- Propiedades del concreto (Módulo de elasticidad y módulo de ruptura)**

Las propiedades del concreto que influyen en el diseño de una estructura de pavimento se detallan a continuación:

El **módulo de elasticidad** del concreto ( $E_c$ ), es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico, es la pendiente de la línea definida por dos puntos de la curva del esfuerzo-deformación, dentro de esta zona elástica. El valor del módulo de elasticidad del concreto de peso normal se puede obtener según ASTM C39 ó AASHTO T22, T140; o en función del esfuerzo a compresión ( $f'_c$ ) a una edad de 28 días, según el American Concrete Institute, (ACI).

En nuestro caso la estimación corresponde al valor aproximado de:  **$26,000$  MPa**. El diseño es poco sensible a esta variable.

El **módulo de ruptura** del hormigón ( $S'_c$ ) es el esfuerzo de tracción por flexión en la fibra extrema bajo la carga de rotura de acuerdo con el método de ensayo AASHO T-97 cuyo equivalente es ASTM C 78, ensayo que utiliza vigas prismáticas de  $15 \times 15$  cm de sección transversal, con una longitud de ensayo de  $45$  cm y carga en los tercios centrales y se evalúa mediante la resistencia a los 28 días.

Se adoptará un valor promedio  **$S'_c = 4.50$  MPa**, usual para proyectos de

pavimentación.

#### f.- Coeficiente de transferencia de carga (J)

El coeficiente J representa la eficiencia de transferencia de carga que tiene una losa del pavimento al transmitir fuerzas cortantes a las losas adyacentes, esto tiene por objeto minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento.

Se usa en el diseño de pavimentos rígidos para considerar el apoyo lateral provisto en las esquinas de la losa. Los dispositivos de transferencia de cargas, interacción de agregados, y la presencia de bermas de hormigón vinculadas tienen un efecto en este valor, coeficientes de transferencia de carga más altos corresponden a menor soporte provisto para el pavimento, con menor soporte, se espera que el pavimento será más susceptible al bombeo, y otros deterioros relacionados con juntas y esquinas.

**TABLA 5.3.- Coeficiente de Transferencia de Carga**

Coeficiente de transferencia de carga recomendada para varios tipos de pavimento y condiciones de diseño				
Berma	Asfalto		Concreto de Cemento Portland	
	SI	NO	SI	NO
<b>Dispositivo de transferencia de carga</b>				
<b>Tipo de pavimento</b>				
1.- Juntas simples y juntas reforzadas	3.2	3.8 - 4.4	2.5 - 2.9	3.6 - 4.2
2.- Continuamente Reforzada	2.9 - 3.2	N / A	2.3 - 2.9	N/A

Fuente: AASHTO Guía de Diseño Parte II. Sección 2.4.2.

Se ha realizado el diseño considerando una berma de asfalto con dispositivo de transferencia, por lo que el factor adoptado es de **3.20**

#### g.- Coeficiente de drenaje (Cd)

El coeficiente de drenaje fue incorporado en la guía AASHTO para diseño de pavimentos rígidos a raíz de los efectos del drenaje en el desempeño de la estructura

de pavimento, tales como el efecto de la humedad en la resistencia de la subrasante y en la erosionabilidad de la subbase.

Para la selección del coeficiente de drenaje, AASHTO provee la siguiente tabla:

**TABLA 5.4.- Calidad de Drenaje en función al Tiempo en que alcanza 85 % de Saturación**

<b>Drenaje</b>	
<b>Calidad de drenaje</b>	<b>agua removida en:</b>
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	Nunca drena el agua

**TABLA 5.5.- Coeficiente de Drenaje**

<b>Coeficiente de Drenaje</b>				
<b>Calidad de drenaje</b>	<b>Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento se encuentra en niveles de humedad cercanos a la saturación.</b>			
	<b>menos del 1%</b>	<b>1 - 5%</b>	<b>5 - 25 %</b>	<b>Más de 25%</b>
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Bueno	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Regular	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Pobre	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy Pobre	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

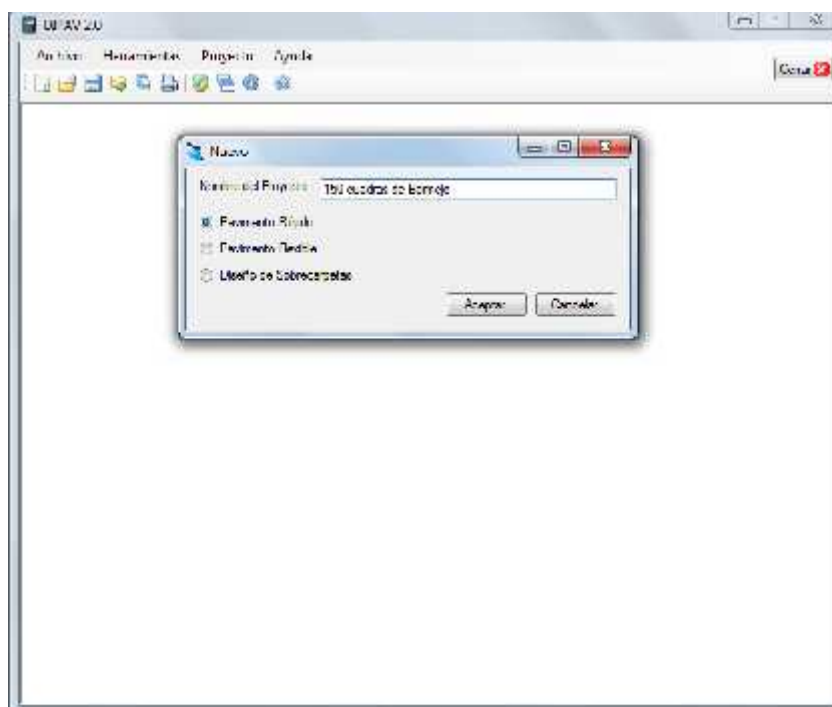
Las condiciones hidrológicas del terreno, indican un drenaje entre regular y bueno y las características de precipitación de la zona nos llevan a deducir que entre el 5 al 25% del tiempo, el pavimento estará en niveles cercanos a la saturación, por tanto el valor adoptado corresponde a **1.10**

Entonces abrimos el programa e introducimos los datos de entrada:



Al hacer esto nos aparece una ventana en la cual debemos seleccionar la pestaña archivo y en esta seleccionar nuevo, como se muestra a continuación:

**Figura 5.4.- Nombre del Proyecto – DIPAV 2.0**



**Figura 5.5.- Datos de Entrada completos – DIPAV 2.0**

### 5.3.1.2.- Métodos Mecanicistas

#### 5.3.1.2.1.- PCA 84 – BS PCA

**Resistencia del Apoyo:** Introducimos el valor K correspondiente a la resistencia de la capa de subrasante ó subbase en cualquiera de las siguientes unidades: MPa/m, Tn/m<sup>3</sup>, PCI.

El valor que utilizaremos será **38 kPa/mm**

**Espesor de la Losa:** En este campo se elige el espesor de losa propuesta, el espesor podrá tener cualquiera de las siguientes unidades: mm, pulgadas

Asumimos un espesor inicial de **200 mm.**

**Módulo de Rotura de la Losa:** Valor que corresponde al módulo de rotura de la losa a construir, puede estar dada en las siguientes unidades: Mpa, Kg/cm<sup>2</sup>, PSI.

El valor es **4.5 Mpa.**

**Bermas y Pasadores:** En este proyecto asumiremos que existen bermas y pasadores.

**Figura 5.6.- Datos de Entrada – BS PCA**

**Tránsito:** El sistema permite la entrada de las cargas de tránsito a ser soportadas por el pavimento discriminado por ejes sencillos, tándem y tridem dadas en kN, Tn ó Kips.

Para cada uno de los ejes se deberán digitar las cargas y repeticiones resultantes del análisis de tránsito de la vía en estudio.

Composición de tráfico vehicular	Livianos		Buses			Camiones				Otros	Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Distribución	Composición Vehicular (%)										
	78.81%		6.92%			5.89%	7.18%	4.78%	1.52%	0.05%	100.00%
	75.31%		6.92%			17.77				1.57%	
<b>Pavimento Rígido</b>			<b>Pf = 2.5 e = 20 cm (8")</b>			<b>Total vehíc. = 5.543.100</b>		<b>Período de diseño (años) = 20</b>			
Factores Equivalentes Vehiculares	No se considera		0.0007672			0.5298	4.4894	4.3383	7.5807		<b>Total</b>
Total Vehículos			289			170.165	1.757.746	1.130.813	649.011		
Ejes Acumulados			1			90.154	7.891.225	4.905.807	4.919.958		<b>3.708.024</b>
										<b>Total (un carril)</b>	<b>1.854.012</b>

En esta tabla se muestra que los ejes de los vehículos livianos no son tomados en cuenta en el diseño, para introducir estos datos de tráfico en el programa se considerara que

los vehículos de tipo 3 hasta el 7 serán tomados como ejes sencillos, los tipos 8 al 10 serán tomados como ejes tandem; por lo tanto a continuación se muestra los valores que serán tomados como datos para su aplicación:

**Ejes sencillos:**  $1 + 90.154 + 7.891.225 = 7.981.380$

**Ejes tandem:**  $4.919.958 + 4.905.807 = 9.825.765$

Estos valores son el 100 % de tráfico que circulara por la vía, como la distribución por carril es de 50 % solo se tomara este porcentaje como datos de entrada para el programa:

**Ejes sencillos:**  $7.981.380 / 2 = 3.990.690$

**Ejes tandem:**  $9.825.765 / 2 = 4.912.883$

Luego de realizar todos estos pasos nos aparece una ventana en la cual debemos introducir todos los datos necesarios para diseñar el pavimento rígido:

**Figura 5.7.- Ingreso Ejes Simples - BS PCA**

No. Ejes (EN)	Repetición Esperada
1	3990690
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

**Figura 5.8.- Ingreso Ejes Tándem - BS PCA**

### 5.3.1.2.2.- KENPAV Y WESTERGAARD – KENPAV

Los datos de entrada son los siguientes:

Calculamos el tráfico acumulado con los datos del proyecto:

Composición de tráfico vehicular	Livianos		Buses			Camiones				Otros	Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Distribución	Composición Vehicular (%)										
	78.81%		6.92%			5.89%	7.18%	4.78%	1.52%	0.05%	100.00%
	75.31%		6.92%			17.77				1.57%	
Pavimento Rígido			Pf = 2.5		e = 20 cm (8")		Total vehíc. = 5.543.100		Período de diseño (años) = 20		
Factores Equivalentes Vehiculares	No se considera		0.0007672			0.5298	4.4894	4.3383	7.5807		Total
Total Vehículos			289			170.165	1.757.746	1.130.813	649.011		
Ejes Acumulados			1			90.154	7.891.225	4.905.807	4.919.958		3.708.024
										Total (un carril)	1.854.012

En esta tabla se muestra que los ejes de los vehículos livianos no son tomados en cuenta en el diseño, para introducir estos datos de tráfico en el programa se considerara el total de vehículos de tipo 6 hasta el 10 (camiones); por lo tanto a continuación se muestra los valores que serán tomados como datos para su aplicación:

**Camiones (MJA):**  $5,89 + 7,18 + 4,78 + 1,52 + 0,05 = 19,42 \%$  de  $5.543.100 = 1.076.470$

Estos valores son el 100 % de tráfico que circulara por la vía, en un año y durante una vida útil de 20 años entonces como la distribución por carril es de 50 % solo se tomara este porcentaje, como dato de entrada para el programa.

**a.- N: Trafico acumulado=**  $1.076.470/2 = 538.236$

**b.- n: Periodo de Diseño (años).**- El tiempo de vida de las vías urbanas que generalmente se adopta es igual a **20 años**.

**c.- i: Tasa de Crecimiento Anual (%)**

### **Determinación y Selección de las Tasas de Crecimiento para la Proyección**

Las secciones precedentes analizaron las tendencias y tasas de crecimiento de aquellos parámetros que tienen relación con el crecimiento del tráfico. Esta sub-sección procede a definir las tasas que serán consideradas en la proyección. Para este efecto se buscarán las tasas de crecimiento para cuatro grupos que representan a todo el espectro de vehículos considerados en la composición vehicular. Estos grupos son:

- ✓ Vehículos livianos (automóviles, etc.)
- ✓ Omnibuses
- ✓ Camiones

Inicialmente se hace un resumen de los resultados para al final presentar las tasas de proyección adoptadas.

- En el caso de la población, el crecimiento total del departamento de Tarija es de 7.18% En ese sentido considerando solo la región influenciada por las vías urbanas de la ciudad de Bermejo el crecimiento poblacional promedio es de 3.77% valor que es más representativo para el proyecto.
- El análisis del crecimiento del parque vehicular muestra crecimientos que oscilan entre 3.9% y 7.1%.

Considerando por un lado que los crecimientos en períodos largos tienden a presentar una leve inclinación y a objeto de representar esta situación es que, para la proyección se optó por definir dos tasas de crecimiento para cada grupo vehicular.

Utilizaremos para el proyecto el factor más desfavorable es decir el valor más alto para la proyección que consideramos el más crítico que es de **7,1%**.

#### **d.- CAM: Coeficiente de Agresión Media**

**Tabla 3.18.- Determinación del Coeficiente de Agresividad Media**

<b>Estructura</b>	<b>Coeficiente de Agresividad Media (CAM)</b>
Asfáltico h<20 cm	0.8
Asfáltico h = 20 cm	1.0
Semirrígido	1.3
Concreto	1.3
Suelo, grava no tratada o GRH	1.0
mixta material asfáltico	0.8
mixta material tratado con ligante hidráulico	1.3
Inversa material asfáltico	0.8
Inversa Grava recompuesta humidificada GRH	1.0
Inversa material con ligante hidráulico	1.3

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos, edición 2003

Para el proyecto se tomara el valor es **1.3**

#### **e.- Datos Estructurales del Concreto y la Subbase**

##### **Módulo de Elasticidad “E”**

Es el esfuerzo de tensión en la fibra extrema bajo la carga de rotura. El módulo de ruptura requerido como dato para el procedimiento de diseño es el valor promedio determinado después de 28 días usando el ensayo de carga del tercio central (AASHTO T97, ASTM C78). Es importante recalcar que estos valores, típicamente situados en un rango entre 21,000 a 35,000 MPa, son simplemente una aproximación para efectos de diseño con un razonable margen de error.

En nuestro caso la estimación corresponde al valor aproximado de: **26,000 MPa**

### a) Coeficiente de Poisson

Es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. El nombre de dicho coeficiente se le dio en honor al físico francés Simeon Poisson.

**Tabla 3.19.- Coeficiente de poisson**

Material	Coeficiente de Poisson
Mezcla asfáltica densa	0,25 a 0,40
Materiales Granulares no-tratados	0,30 a 0,40
Suelos Finos	0,30 a 0,50
Suelos Arcillosos Saturados	0,40 a 0,50
Concreto	0.25 a 0.35

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos, edición 2003

### b) Características de los Materiales

- $\sigma_f$  (10°C, 25Hz): Es el esfuerzo para el cual la ruptura convencional en flexión sobre la probeta es obtenida al aplicar  $1 \times 10^6$  ciclos a una temperatura de 10 °C y a una frecuencia de 25 Hz. Este valor es dado por  $10^6$ .
- $-1/b$ : Es la pendiente de la ley de fatiga del material.
- SN: Es la dispersión del material en el ensayo de fatiga.

**Tabla 3.20.- Características del Concreto**

Tipo de concreto	E (Mpa)	$\sigma_f$ (Mpa)	b	SN
Concreto	35000 - 26000	2.15	-1/16	1
Concreto Pobre	26000 - 24000	1.63	-1/15	1

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos, edición 2003

### c) Riesgo

Para las calzadas en concreto sobre una capa de fundación se considera que:

- En una primera fase, los desarrollos de las degradaciones en la capa subbase y en la capa de fundación son independientes.
- El comportamiento de la capa subbase no está influenciado por la degradación de la capa de fundación sino después de un cierto tiempo.

Por lo tanto:

- Para las estructuras en concreto armado en continuo y el concreto con o sin pasadores, el riesgo de cálculo  $r_2$  se toma igual al 50%.

**Tabla 3.21.- Valores de Riesgo “r”(%)**

		<b>T5</b>	<b>T4</b>	<b>T3</b>	<b>T2</b>
<b>Estructuras</b>	<b>MB</b>	2.0	5.0	12.0	25.0
	<b>MTLH</b>	2.5	5.0	7.5	12.0
<b>Estructuras Inversas</b>	<b>MB</b>	2.0	5.0	12.0	25.0
	<b>MTLH</b>	5.0	10.0	15.0	24.0
<b>Estructuras Mixta</b>	<b>MB</b>	2.0	15.0	12.0	25.0
	<b>MTLH</b>	3.0	10.0	<b>20.0</b>	35.0
<b>Estructuras en Asfalto CdBase</b>		2.8	5.0	7.5	11.5
<b>Sub-Rasante salvo BAC y BCg</b>		5.6	10.0	15.0	23.0
<b>Sub-Rasante para BAC y BCg</b>		50.0	50.0	50.0	50.0

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos, edición 2003

Entonces abrimos el programa e introducimos los datos de entrada:



Figura 5.9.- Nuevo Diseño – KENPAV



Figura 5.10.- Ingreso de datos de Trafico- KENPAV

**CALCULO DEL TRAFICO**

Opciones

Calcular Tráfico

CAM y N

$$N = 365 * MUA * \left( \frac{(1+i)^n - 1}{i} \right)$$

Variables

MUA :  Número de vehículos pesados

n :  ( años ) Período de diseño

i :  ( % ) Tasa de Interés Anual

CAM :  Coeficiente de Adecuación Macra

N :  ( 13 Ton ) Tráfico Acumulado

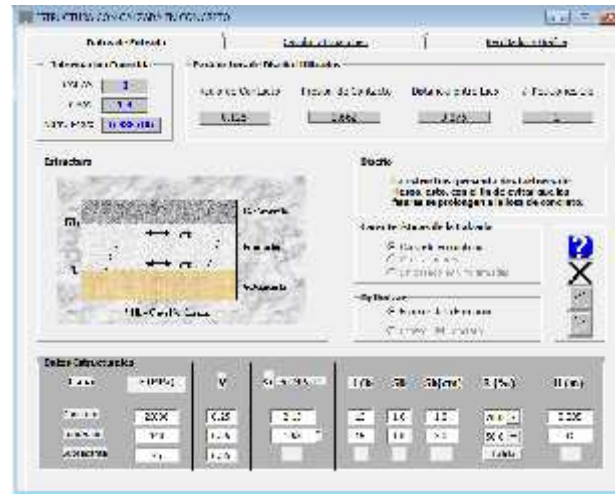
Figura 5.11.- Características de Diseño- KENPAV

**CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO**

- tipo de Estructura

- 1- ESTRUCTURA CON TRAFICO BAJO (TSD)
- 2- ESTRUCTURA CON TRAFICO BAJO (C/Asfáltica)
- 3- ESTRUCTURA CON CAPAS BITUMINOSAS GRUESAS
- 4- ESTRUCTURA CON CAPAS GRAVA ASFILTO
- 5- ESTRUCTURA TRATADA CON ENLANTES ENGRANULADOS
- 6- ESTRUCTURA MIXTA
- 7- ESTRUCTURA INVERSA
- 8- ESTRUCTURA CALZADA EN CONCRETO
- 9- ESTRUCTURA CON EXISTENCIA DE AFIRMADO

**Figura 5.12.- Ingreso de Datos Estructurales - KENPAV**



### 5.3.1.3.- Métodos Empírico-Mecanicistas

#### 5.3.1.3.1.- M-E PDG

Los datos de entrada son los siguientes:

Calculamos el tráfico acumulado con los datos del proyecto:

AÑO	NORMAL	GENERADO	DERIVADO	TOTAL
2011	124	37	25	186
2012	133	40	27	200
2013	142	43	28	213
2014	153	46	31	230
2015	164	49	33	246
2016	176	53	35	264
2017	188	56	38	282
2018	202	61	40	303
2019	216	65	43	324
2020	232	70	46	348
2021	249	75	50	374
2022	266	80	53	399
2023	286	86	57	429
2024	306	92	61	459
2025	328	98	66	492
2026	352	106	70	528
2027	377	113	75	566
2028	404	121	81	606

2029	433	130	87	650
2030	465	140	93	698
2031	498	149	100	747
Compos. (%)	100			

**TPDA inicial 2 carriles= 186**

**Tasa de Crecimiento:** Las tasas de crecimiento promedio utilizadas para la proyección del tráfico se presentan a continuación en la Tabla.

**Tabla 5.1.-Tasa de Crecimiento Promedio**

Factores	Local (%)	Nacional (%)
Consumo anual de diesel	2,25	6,05
Consumo anual de gasolina	2,1	4,15
Consumo anual de combustibles	3,035	3,29
Parque automotor	7,1	7,79
Numero de vehículos-km-año	5,3	12,12
Producto Interno Bruto	4,2	4,75
<b>Tasa Adoptada</b>	<b>7,1</b>	

Fuente: Proyecto 150 cuerdas - Plan Maestro de Transportes

Basándose en este conjunto de variables económicas se ha encontrada una tasa anual de 7.1%, que se utilizó para proyectar el TPDA para el horizonte del proyecto, tomando como base el dato de TPD del año 2011.

La **velocidad directriz** está actualmente restringida por las condiciones de operación de la vía urbana, tanto en geometría horizontal como en pendientes. Las velocidades promedio de operación actuales varían entre 27 km/h para vehículos livianos y 20 km/h para camiones dentro de las vías del área de estudio. Estos valores podrían incrementarse con la pavimentación; sin embargo, algunas condiciones físicas de la vía existente y los factores externos como peatones, transporte público, comercio, etc., han obligado a limitar la velocidad de diseño en **30 Km/h**.

### Porcentaje de Camiones.-

Composición de tráfico vehicular	Livianos		Buses			Camiones				Otros	Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Distribución	<b>Composición Vehicular (%)</b>										
	78.81%		6.92%			5.89%	7.18%	4.78%	1.52%	0.05%	100.00%
	75.31%		6.92%			17.77			1.57%		
<b>Pavimento Rígido</b>			<b>Pf = 2.5</b>	<b>e = 20 cm (8")</b>		<b>Total vehíc. = 5.543.100</b>		<b>Período de diseño (años) = 20</b>			
<b>Factores Equivalentes Vehiculares</b>	No se considera		0.0007672			0.5298	4.4894	4.3383	7.5807		<b>Total</b>
<b>Total Vehículos</b>			289			170.165	1.757.746	1.130.813	649.011		
<b>Ejes Acumulados</b>			1			90.154	7.891.225	4.905.807	4.919.958		<b>3.708.024</b>
										<b>Total (un carril)</b>	<b>1.854.012</b>

**Sumamos el porcentaje de camiones:  $17.77 + 1.57 = 19.3$**

**Clima.-** Hidrológicamente la ciudad de Bermejo se asemeja a la ciudad de Austin Texas es por eso que utilizaremos los datos de dicha ciudad de los Estados Unidos. (Ver Anexos)

### Diseño Preliminar

El usuario debe proponer un diseño preliminar

Utilizamos el siguiente diseño:

- PCC (Concreto de Cemento Portland).- Capa de 8" de espesor
- Subbase.- Capa de 5", 12.5 cm de espesor
- Subbase A-1-a con CBR 50%
- Subrasante A-4 (AASHTO) CBR= 4.5%
- De acuerdo con el criterio usado en la actualidad se tiene que para carreteras con un tránsito menor a 1000 vehículos pesados, se recomienda que el espesor de las bases sea de 12 cm. Y cuando el tránsito sea mayor, se recomienda que el espesor mínimo sea de 15cm.

### Diseño de Prueba – Propiedades del JPCP

- Losa de 15 pies de largo
- Pasa-juntas de 1” de diámetro para las juntas transversales
- Espacio de 12” entre cada pasa juntas
- Drenaje al borde de la berma

**Figura 5.13.- Nuevo Proyecto – M-E PDG**



**Figura 5.14.- Identificación del Proyecto – M-E PDG**



Figura 5.15.- Parametros en Analisis – M-E PDG

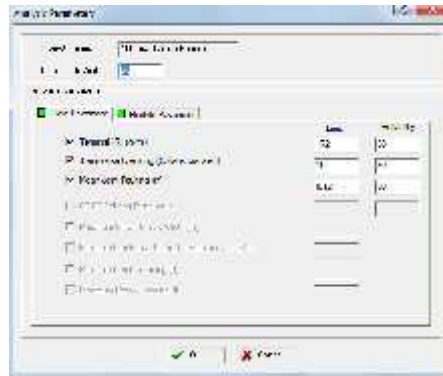


Figura 5.16.- Datos de Trafico – M-E PDG

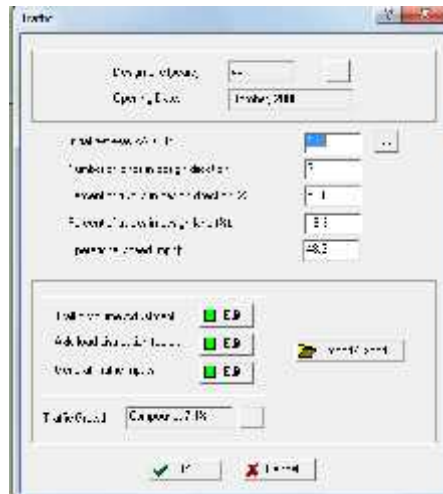
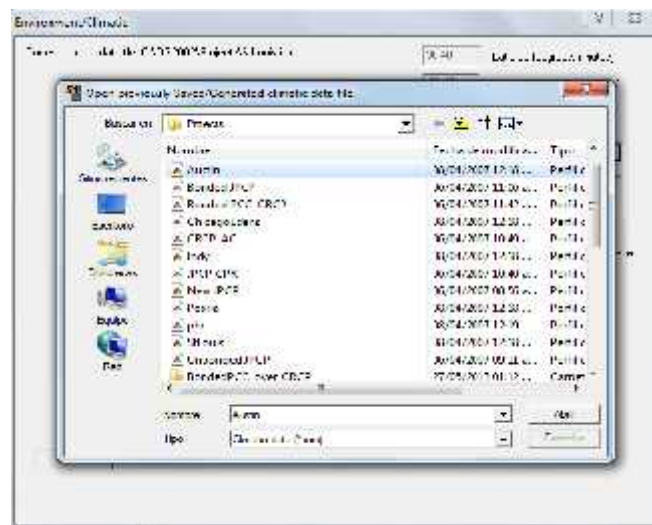
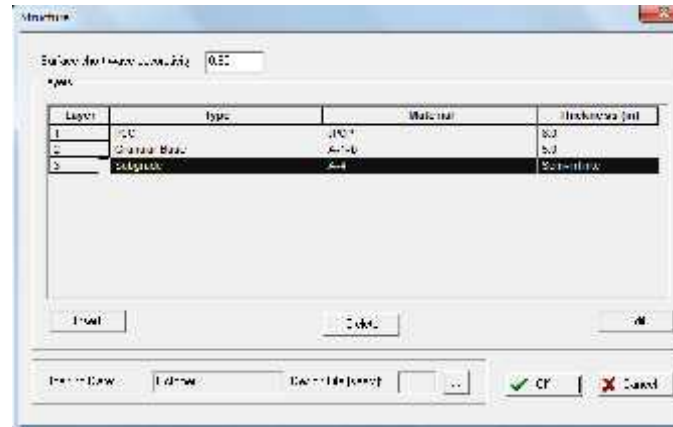


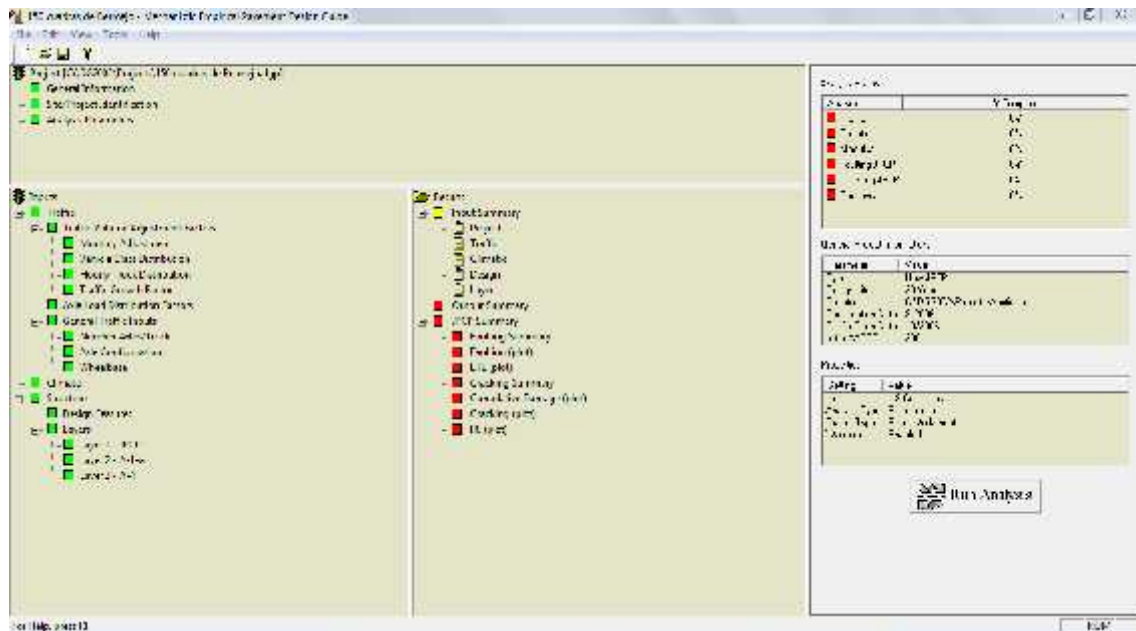
Figura 5.17.- Datos de Clima “Austin Texas” – M-E PDG



**Figura 5.18.- Capas de la Estructura – M-E PDG**



**Figura 5.19.- Datos de Entrada Completos – M-E PDG**



## 5.3.2.- Procesamiento

### 5.3.2.1.- Métodos Empíricos

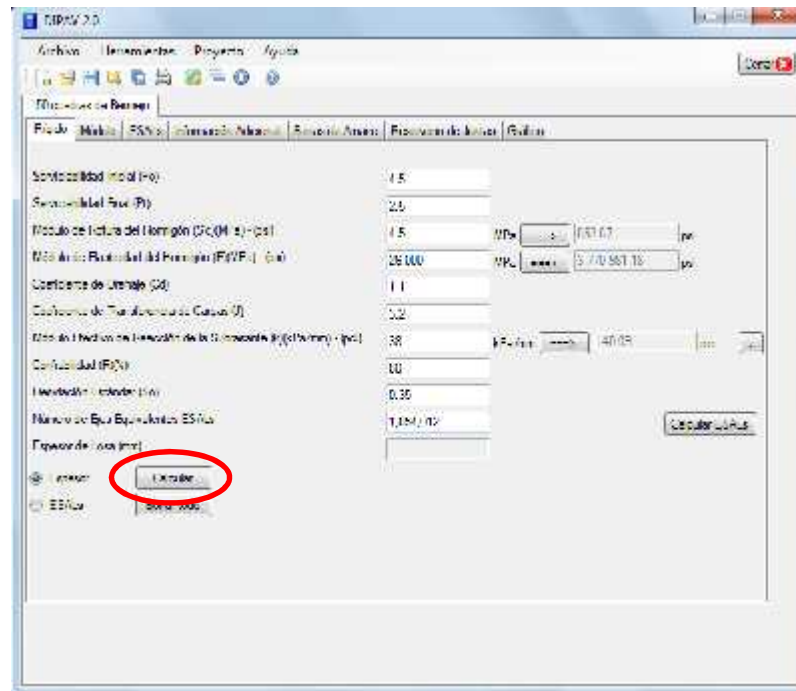
#### 5.3.2.1.1.- AASHTO 1993 – DIPAV 2.0

A continuación, se presentan las características de los datos del procesamiento del programa DIPAV 2.0.

Teniendo todos los datos de entrada completos podemos hacer click en el botón:



**Figura 5.20.- Interfaz Principal – DIPAV 2.0**



Para poder tener un dimensionamiento completo debemos proponer un diseño preliminar:

Utilizamos el siguiente diseño:

- PCC (Concreto de Cemento Portland).- Capa de espesor calculado 171 mm, adoptado 175 mm
- Subbase.- Capa de 5", 12.5 cm de espesor
- Subbase A-1-a con CBR 50%
- Subrasante A-4 (AASHTO) CBR= 4.5%
- De acuerdo con el criterio usado en la actualidad se tiene que para carreteras con un tránsito menor a 1000 vehículos pesados, se recomienda que el espesor de las bases sea de 12 cm. Y cuando el tránsito sea mayor, se recomienda que el espesor mínimo sea de 15cm.





➤ **Reservorio de juntas**

**Coefficiente de Expansión Térmica del Hormigón**

El coeficiente de expansión térmica del hormigón es una medida del cambio de dimensiones del material cuando está sujeto a variaciones de temperatura

**Tabla 4.2. – Coeficiente de expansión térmica en función al tipo de agregado grueso**

Tipo de Agregado Grueso	Coefficiente de Expansión Térmico $10^{-6}$ mm/mm/°C ( $10^{-6}$ pg/pg/°F)
Cuarzo	11.91 (6.6)
Arenisca	11.7 (13.5)
Grava	10.8 (6.0)
Granito	9.5 (5.3)
Basalto	8.6 (4.8)
Caliza	6.8 (3.8)

Fuente: AASHTO Guía de Diseño Parte II. Sección 2.5.2 y Tabla 2.10

**Coefficiente de Retracción por Secado de la Losa de Hormigón**

La retracción del hormigón se debe a la evaporación paulatina del agua de la mezcla, que origina también un cambio en su longitud. Depende del contenido de cemento; los tipos de mezclas y agregados utilizados; el uso de aditivos; el contenido de agua; el método y condiciones de curado y los distintos tipos de agregados, se requiere estimar un valor de retracción a los 28 días.

**Tabla 4.3.- Retracción en función a la resistencia a la tensión indirecta**

Tensión Indirecta 28 días Esfuerzo en KPa (psi)	Retracción, mm/mm o pg/pg
menor a 2,100 (300)	0.0008
2.800(400)	0.0006
3.400(500)	0.00045
4.100(600)	0.0003
mayor a 4.800 (700)	0.0002

Fuente: AASHTO Guía de Diseño Parte I. Sección 2.5.2 y Tabla 2.9.

- Rango de temperatura 20°

- Coeficiente de ajuste por fricción de la base 0.8 debido a ser base granular
- Tipo de sellador = Silicona
- Deformación admisible del sellador 0.5 ( fabricante)
- Factor de forma del sellador 1:2 (fabricante)

**Figura.- Reservoirio de Juntas – DIPAV 2.0**

Coeficiente de Escalamiento (0.5 a 5.0) (°C)	1.0
Tipo de Sellador (1-3)	03
Coeficiente de Fricción (por Sello) (transf.)	1.000
Coeficiente de Ajuste por Fricción (base) (transf.)	0.8
Tipo de Sellador	Silicona
Deformación Admisible del Sellador (transf.)	0.5
Factor de Forma del Sellador	1.0
Ancho de la Junta (mm)	5
Ancho del Reservoirio de Junta (mm)	8
Profundidad Mínima del Sello (mm)	4
Profundidad Mínima de Corte de Implugación (mm)	11

Calcular

### 5.3.2.2.- Métodos Mecanicistas

#### 5.3.2.2.1.- PCA 84 – BS PCA

Introduciendo los datos de entrada requeridos, el programa permite calcular los consumos de fatiga (esfuerzo) y erosión haciendo click en el botón

Calcular

**Figura 5.21.- Interfaz Principal – BS PCA**

Para validar o aceptar el espesor de pavimentos propuesto este programa diseña la estructura del pavimento rígido basado en dos criterios:

**Análisis de fatiga:** en el que se controlan los esfuerzos máximos a los que puede estar sometida cada losa, en el que se tiene en cuenta el deterioro de la resistencia a causa de las repeticiones de las cargas.

El procedimiento que sigue el programa para encontrar el consumo por fatiga es el siguiente:

- Mayora las cargas según el factor de mayoración introducida.
- Calcula el número de repeticiones esperadas.
- Según el modelo de diseño de la losa (con o sin apoyo lateral, según el tipo de eje), calcula el esfuerzo admisible.
- Con el esfuerzo admisible y el módulo de rotura de la losa calcula el número de repeticiones admisibles.
- Con el número de repeticiones esperadas y número de repeticiones admisibles calcula el consumo por fatiga, esto realiza para cada carga.
- Por ultimo realiza una sumatoria de todos los consumos por fatiga de cada carga y calcula un consumo total por fatiga.

**Análisis de erosión:** en el que se controlan las deformaciones máximas adoptando un modelo que mida el trabajo que realiza la esquina de la losa cuando es deformada por la acción de las cargas.

El procedimiento que sigue el programa para encontrar el consumo por erosión es el siguiente:

- a. Mayorar las cargas según el factor de mayoración introducida.
- b. Calcular el número de repeticiones esperadas.
- c. Con los datos de entrada calcular el radio de rigidez relativa utilizando la fórmula que se encuentra en el Capítulo III.
- d. Según el modelo de diseño de la losa (con o sin apoyo lateral, con o sin pasadores y según el tipo de eje), calcular la deflexión en la esquina de la losa.
- e. Con la deflexión obtenida calcular el trabajo que realiza la esquina de la losa con una carga de tránsito aplicada.
- f. Luego calcular el coeficiente  $C_1$ , el cual está en función del tipo de material de apoyo de la losa y el espesor de losa propuesto.
- g. Con el valor del trabajo y el coeficiente  $C_1$  obtener el número de repeticiones admisibles.
- h. Con el número de repeticiones esperadas y número de repeticiones admisibles calcular el consumo por erosión, esto se realiza para cada carga de tránsito.
- i. Por último realizar una sumatoria de todos los consumos por erosión de cada carga de tránsito y calcular un consumo total por erosión.

#### **5.3.2.2.2.- Kenpav Westergaard – KENPAV**

Introduciendo los datos de entrada requeridos, el programa permite calcular los esfuerzos admisibles y aplicados haciendo click en el botón



**Calcula Deformaciones Admisibles.-** Con las ecuaciones de esfuerzo y deformación.

Deformaciones Admisibles

$\sigma_{t,c,c} = 1.976$  (MPa)

$\sigma_{t,Fu} = 2.279$  (MPa)

$\epsilon_{p,s} = 604.9E-06$  (%)

**Figura 5.22.-** Calculo y Ecuaciones - KENPAV

Troncosas (Esfuerzos y Deformaciones)

$$\sigma_{t,su} = \sigma_s \left( \frac{NE}{1 \times 10^5} \right)^h * Kc * Kd * Kr * Ks$$

$$\epsilon_{p,su} = 0.012 (Nf)^{0.222}$$

Troncosas (E, delta)

$$Kr = 10^{-U \cdot b \cdot \delta}$$

$$U = \frac{1}{b} \left( \frac{c \cdot S \cdot h}{b} \right)^2$$

Variables

Nº	Tipo	F (MPa)	V	H (m)
1	C.C.	2000	0.25	0.222
2	Tronco	1.97	0.25	1
3	Tronco	2.27	0.25	

Variables Calculadas:

Varia	Kc	Kd	Kr	Ks	Kw
Esfuerzos	1.5	1.001	1.00	1.1	
Deformaciones	1.5	1.001	1.00	0.91	

Deformaciones Admisibles:

$\sigma_{t,c,c} = 1.976$  (MPa)

$\sigma_{t,Fu} = 2.279$  (MPa)

$\epsilon_{p,s} = 604.9E-06$  (%)

**CALCULAR**

### 5.3.2.3.- Métodos Empírico-Mecanicistas

#### 5.3.2.3.1.- AASHTO 2008 – M-E PDG

Introduciendo los datos de entrada requeridos, el programa permite hacer un análisis de falla y agrietamiento haciendo click en el botón:

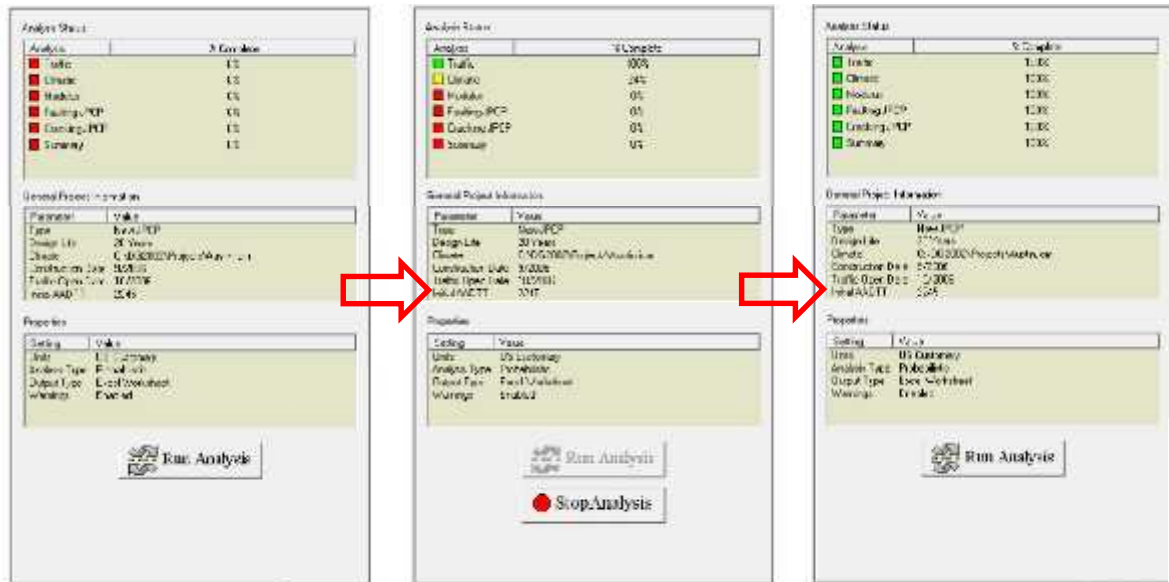


Podemos observar en las siguientes figuras como va analizando las diferentes variables, hasta ejecutarse totalmente el análisis:

- Trafico
- Clima

- Modelos
- Falla
- Agrietamiento
- Informe

**Figura 5.23.- Analisis del Programa M-E PDG**



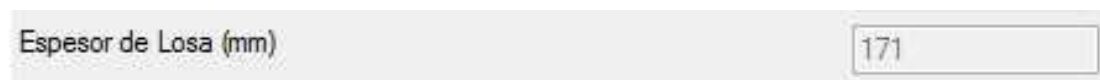
### 5.3.3.- Resultados

#### 5.3.3.1.- Métodos Empíricos

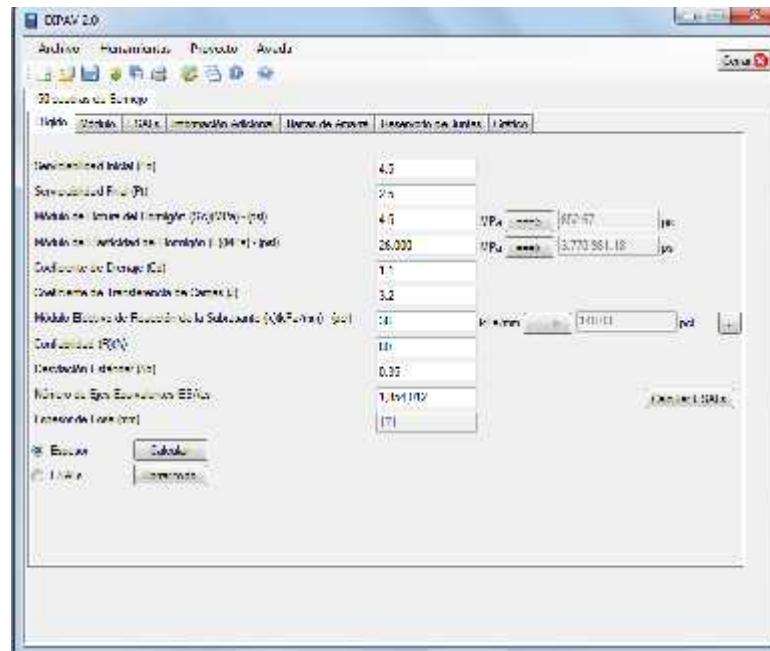
##### 5.3.3.1.1.- AASHTO 1993 – DIPAV 2.0

Los resultados se mostrarán en la parte inferior de la pantalla principal del sistema:

Lo que buscamos es el espesor de la losa



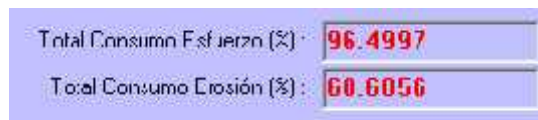
**Figura 5.24.- Resultado de espesor – DIPAV 2.0**



### 5.3.3.2.- Métodos Mecanicistas

#### 5.3.3.2.1.- PCA 84 – BS PCA

Los resultados se mostraron en la parte inferior de la pantalla principal del sistema:



Los consumos deben ser menores pero próximos al 100%

Por lo tanto el espesor de losa óptimo es:



**Figura 5.25.- Resultado de espesor óptimo – BS PCA**



### 5.3.3.2.2.- Kenpav Westergaard – KENPAV

Los resultados se mostraron en la parte inferior de la pantalla principal del sistema:

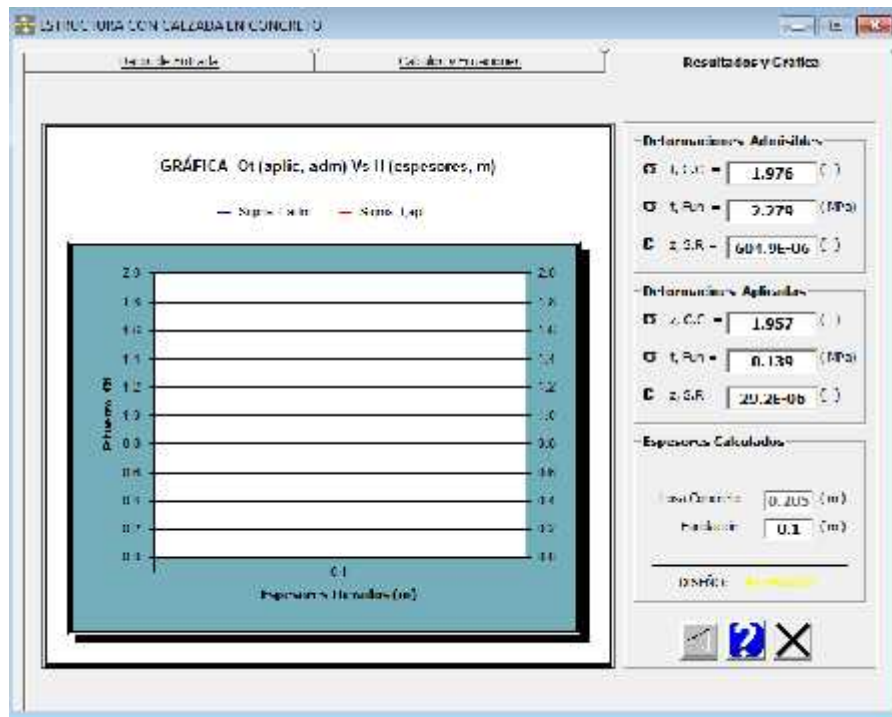
Deformaciones Admisibles		>	Deformaciones Aplicadas	
$\sigma$ t, C.C =	1.976 ( )		$\sigma$ z, C.C =	1.957 ( )
$\sigma$ t, F.u.n =	2.279 (MPa)	$\sigma$ t, F.u.n =	0.139 (MPa)	
$\epsilon$ z, S.R =	604.9E-06 ( )	$\epsilon$ z, S.R =	29.2E-06 ( )	

Por lo tanto el espesor de losa óptimo es:

Espesores Calculados	
Losa Concreto	0.205 (m)
Fundación	0.1 (m)
DISEÑO: <b>ACEPTADO</b>	

Ya que el diseño es aceptado y el esfuerzo admisible es mayor pero con poco

**Figura 5.26.- Resultados y Grafica - KENPAV**



**5.3.3.3.- Métodos Empírico-Mecanicistas**

**5.3.3.3.1.- AASHTO 2008 – M-E PDG**

Los resultados se muestran en tablas de Excel y graficas

**Project: 150 cuadras de Bermejo**

**Reliability Summary**

<b>Performance Criteria</b>	Distress Target	Reliability Target	Distress Predicted	Reliability Predicted	Acceptable
Terminal IRI (in/mi)	172	80	119.1	90.01	Pass
Transverse Cracking (% slabs cracked)	15	80	8	83.17	Pass
Mean Joint Faulting (in)	0.12	80	0.079	85.53	Pass

**Figura 5.27.- Predicción de Fallas Vs Edad de Pavimento**

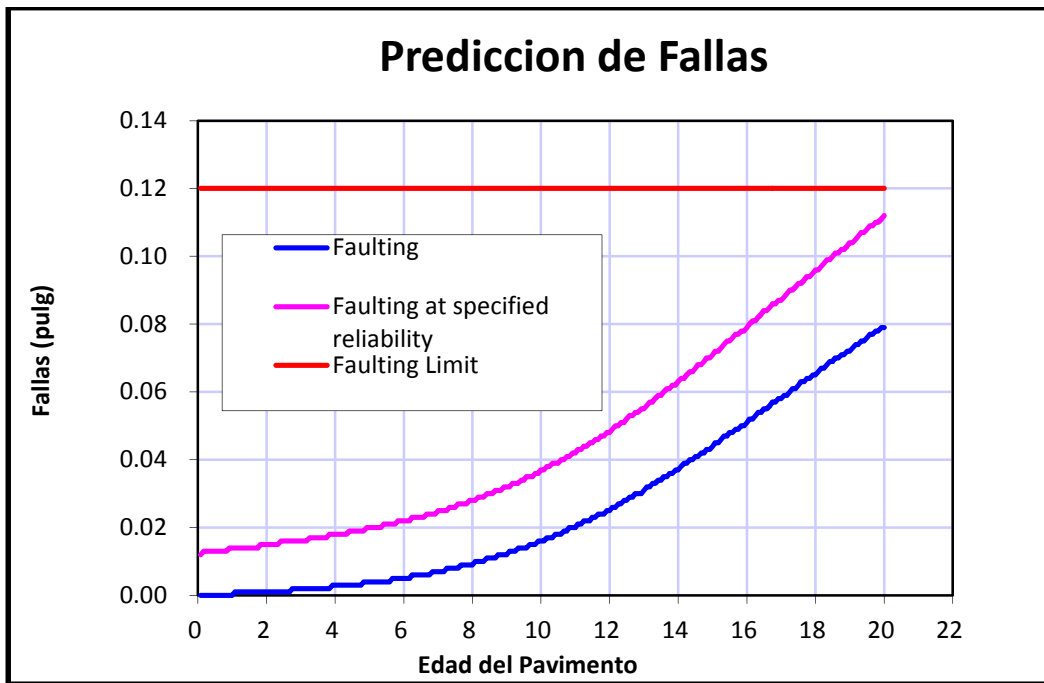


Figura 5.28.- Porcentaje de Agrietamiento de Losa Vs Edad de Pavimento

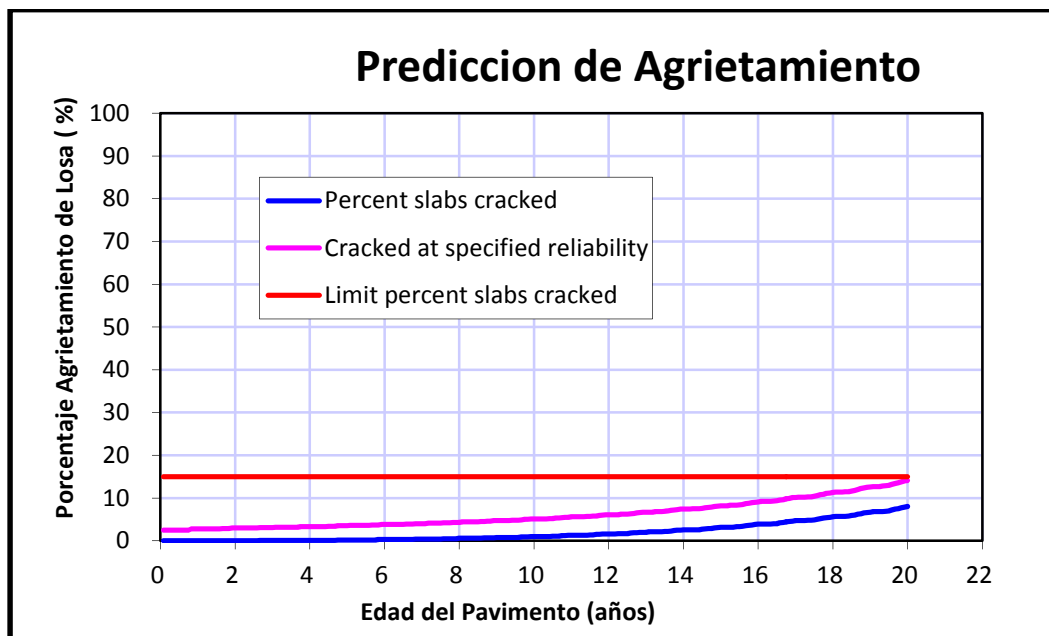
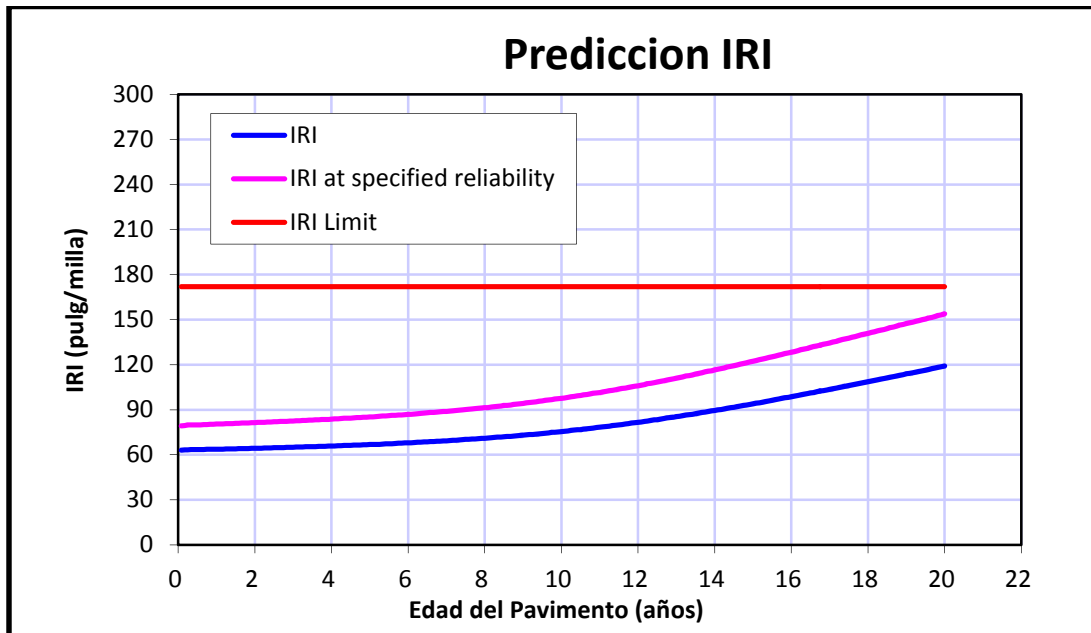


Figura 5.29.- Predicción IRI Vs Edad de Pavimento



Como en las graficas nos muestra: La curva de la prediccion de fallas que seria la azul esta por debajo del limite (roja), pero se encuentra bastante cerca, eso no indica que es un diseño optimo.

Por lo tanto el espesor optimo de la losa es de 8 pulgadas, que serian 200 mm.

**Tabla.- Resultados de las metodologias del espesor del concreto (mm)**

	<i>Empirico</i>	<i>Mecanicista</i>		<i>Empirico-Mecanicista</i>	<i>Empirico</i>
	<i>DIPAV 2.0 (mm)</i>	<i>BS PCA (mm)</i>	<i>KENPAV (mm)</i>	<i>M-E PDG (mm)</i>	<i>DARWin (mm)</i>
Losa concreto	171	175	205	200	<b>220</b>
Subbase	125	125	125	125	<b>200</b>

Resultado oficial de dimensionamiento por parte de la consultoria

#### 5.4.- CUADRO RESUMEN COMPARATIVO

<b>DATOS DE ENTRADA</b>			
	<b>EMPIRICO</b>	<b>MECANICISTA</b>	<b>EMPIRICO-MECANICISTA</b>
<b>TRAFICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Numero de Ejes equivalentes</li> <li>• Coeficiente de Transferencia de Cargas</li> <li>• Datos Estadísticos, coeficiente de confiabilidad y desviación normal estándar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se divide en Ejes sencillos, tándem y tridem.</li> <li>• Número de Vehículos Pesados y tráfico acumulado.</li> <li>• Coeficientes de seguridad, erosión, esfuerzo, de agresividad media.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trafico promedio anual</li> <li>• Factores de Volumen de Trafico</li> <li>• Factor de Ajuste Mensual</li> <li>• Distribución de Clase de Vehículos</li> <li>• Tasa de crecimiento Vehicular</li> <li>• Factor de Distribución de Cargas</li> </ul>
<b>ESTRUC.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Serviciabilidad Inicial y Final</li> <li>• Coeficiente de módulo de subrasante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiedades Generales del Concreto, Fundación y subrasante (Modulo de Rotura, Espesor, Modulo de Reacción, etc), coeficiente de Poisson.</li> <li>• Riesgo de Ruina Admitido para el periodo de diseño.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absorción del terreno</li> <li>• Se puede agregar diferentes capas (base granular, subrasante, etc)</li> <li>• Propiedades Generales y térmicas del concreto.</li> <li>• Propiedades de los materiales de las diferentes capas</li> </ul>
<b>CLIMA</b>	No se toma en cuenta directamente Coeficiente de Drenaje	No se toma en cuenta directamente Análisis por erosión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Latitud, Longitud, Altura</li> <li>• Precipitación media anual</li> </ul>
<b>PROCESAMIENTO</b>			
	Contiene Información Adicional en la cual debemos llenar datos complementarios como ser: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Barras de Amarre</li> <li>• Reservorio de juntas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de Sensibilidad</li> <li>• Calcula variables para deformaciones admisibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de fallas a lo largo de la vida útil</li> </ul>
<b>RESULTADOS</b>			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espesor de la Losa o Numero de Ejes Equivalentes</li> <li>• Graficas de Sensibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo Esfuerzo y Erosión</li> <li>• Deformaciones Aplicadas Vs Deformaciones Admisibles</li> <li>• Optimización de la subbase</li> <li>• Grafica</li> </ul>	Graficas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Predicción de Fallas</li> <li>• Eficiencia de Transferencia de Cargas</li> <li>• Predicción de Agrietamiento</li> <li>• Predicción IRI</li> </ul>

### 5.4.1.- ANALISIS DEL CUADRO COMPARATIVO

En cuanto a los factores de comparación en base al cuadro comparativo realizado se puede establecer lo siguiente:

- En cuanto a los parámetros de entrada todos los métodos tienen entre sus variables comunes que se introducen no de la misma forma pero en igual equidad como ser:
  - ✓ Módulo de reacción de la subrasante (K),
  - ✓ Módulo de rotura del hormigón a los veintiocho días (S'c)
  - ✓ Número de ejes equivalentes (ESALs)
  - ✓ Espesor de la losa
  
- En cuanto a los parámetro entrada del tráfico, sin embargo la forma en que entra esta variable en cada método es distinta ya que en los métodos empíricos es a través de ejes equivalentes mientras que en el método racional es a través de número de vehículos pesados, en cuanto al método empírico-mecanicista existen más variables de entrada sobre el tráfico basados en que este método exige una completa base de datos de tráfico.

<i>empírico</i>	<i>mecanicista</i>		<i>empírico-mecanicista</i>
<i>DIPAV 2.0</i>	<i>BS PCA</i>	<i>KENPAV</i>	<i>M-E PDG</i>
<i>ejes equivalentes a 8.2 ton</i>	<i>tipos de ejes (simples, tándem y trídem) y peso</i>	<i>vehículos pesados (13 ton)</i>	<i>base de datos completos (TPDA, factores de ajuste de volumen, distribución tipo de vehículo, distribución horaria)</i>

- En cuanto al módulo de reacción de la subrasante (K), es un solo parámetro que depende del valor del CBR o del módulo resiliente, obtenido en laboratorio de mecánica de suelos. En la tabla 3.4 del capítulo III (Características de tipo de suelo y relaciones) se muestran sus valores de

acuerdo al tipo de suelo, la diferencia es la nomenclatura en la que se presenta en cada método y la unidad.

<i>empírico</i>	<i>mecanicista</i>		<i>empírico-mecanicista</i>
<b>DIPAV 2.0</b>	<b>BS PCA</b>	<b>KENPAV</b>	<b>M-E PDG</b>
<i>Módulo de reacción de la subrasante (kPa/mm, psi)</i>	<i>Resistencia K del apoyo (Psi, MPa/m, Ton/m3)</i>	<i>Módulo Resiliente E (MPa)</i>	<i>CBR (%) o Modulo de Apoyo(Psi)</i>

- En cuanto al módulo de ruptura del Hormigón a los 28 días, es un parámetro igual para todos los métodos, la diferencia es su nomenclatura y unidad.

<i>empírico</i>	<i>mecanicista</i>		<i>empírico-mecanicista</i>
<b>DIPAV 2.0</b>	<b>BS PCA</b>	<b>KENPAV</b>	<b>M-E PDG</b>
<i>Módulo de rotura del Hormigón S'c (Mpa, Psi)</i>	<i>Modulo Rotura Losa (Psi, MPa, Kg/cm2)</i>	<i><math>\sigma_6</math> (valor por defecto) (MPa)</i>	<i>CBR (%) o Modulo de Apoyo(Psi)</i>

- En cuanto al espesor de la losa, es un parámetro igual para todos los métodos, la diferencia es su nomenclatura y unidad.

<i>empírico</i>	<i>mecanicista</i>		<i>empírico-mecanicista</i>
<b>DIPAV 2.0</b>	<b>BS PCA</b>	<b>KENPAV</b>	<b>M-E PDG</b>
<i>Espesor de Losa (mm) dato o resultado</i>	<i>Espesor de la Losa (mm, pulg)</i>	<i>H (m)</i>	<i>Espesor Capa (pulg)</i>

- Como las variables de entrada más importantes podemos recalcar:

<i>empírico</i>	<i>mecanicista</i>		<i>empírico-mecanicista</i>
<i>DIPAV 2.0</i>	<i>BS PCA</i>	<i>KENPAV</i>	<i>M-E PDG</i>
<i>Trafico (ejes equivalentes), serviciabilidad inicial y final y Confiabilidad de diseño ( R )</i>	<i>Trafico ( tipo de ejes y pesos)</i>	<i>Trafico (camiones) y Riesgo ( R )</i>	<i>Trafico con base de datos, Datos Estructurales específicos(tipo de capa base, subbase) entrada directa del clima (precipitación media anual)</i>

- El método empírico tiene como ventaja la entrada de datos de trafico de acuerdo a una tabla de equivalencia de acuerdo al peso del vehiculo (8.2 tn), también tiene la variable de serviciabilidad que está directamente relacionada con el IRI el cual nos puede indicar el comportamiento del pavimento según la serviciabilidad inicial y final.
- La confiabilidad igual es un parámetro de mucha importancia ya que es la probabilidad del desempeño de la vía se mantenga en niveles adecuados.
- El método mecanicista BS PCA tiene como ventaja la entrada de valores del tráfico ya que se puede dividir en pesos de acuerdo al tipo de ejes.
- El método mecanicista KENPAV tiene como ventaja la variable del riesgo ya que representa el porcentaje de la degradación de la capa subbase y la fundación.
- Los métodos mecanicistas a diferencia de los métodos empíricos estos le dan mayor importancia a los datos estructurales, es por eso que tienen mayores variables de entrada en este campo.

- El método empírico mecanicista es el más completo debido a la complejidad de sus parámetros de entrada tanto en tráfico, estructurales y de clima. La desventaja es que precisa de una base de datos de tráfico minuciosos y específicos como de clima.
- En el rubro de procesamiento cada uno tiene principios diferentes por lo tanto su procesamiento es diferente.

<i>empírico</i>	<i>mecanicista</i>		<i>empírico-mecanicista</i>
<i>DIPAV 2.0</i>	<i>BS PCA</i>	<i>KENPAV</i>	<i>M-E PDG</i>
<i>ecuación general guía AASHTO 93</i>	<i>Método de Elemento Finitos</i>	<i>Método Racional</i>	<i>Predecir fallas a los largo de la vida útil basado en experiencia y modelos matemáticos</i>

- El método empírico ayuda a optimizar el diseño con diversas características de los pavimentos rígidos que no forman parte del diseño estructural del espesor de losa, pero son importantes para su desempeño y por tanto requieren atención, estas son: acero en juntas transversales y longitudinales, dimensiones y características del sello de juntas y espaciamiento entre juntas transversales.
- El método mecanicista contiene un análisis de sensibilidad el cual nos ayuda a optimizar los resultados, puede ayudar a construir diferentes escenarios (situaciones), que pudieran presentarse durante la ejecución del proyecto. Esta herramienta nos permite tener una visión más cercana de lo que pudiera ocurrir.
- En los resultados podemos ver las siguientes características:

<i>empírico</i>	<i>mecanicista</i>		<i>empírico-mecanicista</i>
<i>DIPAV 2.0</i>	<i>BS PCA</i>	<i>KENPAV</i>	<i>M-E PDG</i>
<i>Espesor de la Losa (mm) o Numero de Ejes Equivalentes, Grafica de Sensibilidad de parámetros de entrada Vs espesor</i>	<i>% de fatiga y erosión</i>	<i>Deformaciones Admisibles Vs Deformaciones Aplicadas de las 3 capas que componen en pavimento rígido</i>	<i>Graficas: Predicción de Fallas, Predicción de Agrietamiento y Predicción IRI en función de la vida útil de la estructura</i>

- Una gran diferencia entre el método empírico y el mecanicista es el resultado. Para el método mecanicista el espesor de la losa es uno de los resultados, en cambio para el método mecanicista es un dato inicial.
- El método mecanicista BS PCA mediante Métodos de Elementos Finitos puede ofrecer resultados del consumo de esfuerzo fatiga y erosión, causadas por el peso y la repetición de cargas de los ejes de tráfico, los cuales deben ser menores pero próximos a 100% para que el dimensionamiento sea óptimo.
- El método mecanicista KENPAV mediante el método racional obtiene deformaciones admisibles
- El método empírico-mecanicista es el más complejo y con el que obtenemos mayores resultados. Nos muestra un reporte final en el cual están todos los datos de entrada, procesamiento de datos y graficas de resultados finales.
  - Predicción de Fallas
  - Predicción de Agrietamiento
  - Predicción IRI

- Las cuales están relacionadas directamente con la vida útil del pavimento, y nos indica el comportamiento de las variables respecto al tiempo, con sus respectivas limitantes de diseño y confiabilidad.

### 5.5.- Análisis de los programas con valores extremos de los parámetros.

Para realizar el análisis de resultados de los programas con valores medios, se analizaran los cuatro parámetros de entrada más importantes de cada programa estudiado, se trabajara con los parámetros de entrada

- Módulo de reacción de la subrasante (K),
- Módulo de rotura del hormigón a los veintiocho días (S'c)
- Número de ejes equivalentes (ESALs)
- Espesor de la losa

Como datos iniciales tomaremos los siguientes:

		METODOS				
		EMPIRICO	MECANICISTA		EMPIRICO MECANICISTA	
DATOS	VARIABLES	DIPAV 2.0	BS PCA	KENPAV	M-E PDG	
TRAFICO	Serviciabilidad	Inicial	4.5	-	-	4.5
		Final	2.5	-	-	2.5
	Factor de seguridad de carga		-	1.2	-	-
	Factor de mayoracion de repeticiones		-	1	-	-
	N° de Ejes Equivalentes	Ejes sencillos	variable	variable	-	variable
		Ejes tandem		variable	-	
		Ejes Tridem		variable	-	
	N° de vehiculos pesados		-	-	variable	40%
	Tasa de Crecimiento		4	-		4
Coeficiente de agresividad Media		-	-	1.3	-	
ESTRUCTURALES	Modulo de Rotura	variable	variable	variable	variable	

	<b>Propiedades de la Losa</b>	<b>Modulo de Elasticidad</b>	26000 Mpa	26000 Mpa	26000 Mpa	26000 Mpa
		<b>Espesor</b>	variable	variable	variable	variable
	<b>Propiedades de la Subrasante</b>	<b>Modulo de Reaccion</b>	variable	variable	variable	variable
		<b>Modulo de Elasticidad</b>	100 Mpa	100 Mpa	100 Mpa	100 Mpa
		<b>Espesor</b>	-	-	-	10 cm
	<b>Periodo de Diseño</b>		20 años	20 años	20 años	20 años
	<b>Coefficiente de Transferencia de Cargas</b>		3.2	-	-	-
	<b>Coefficiente de Drenaje</b>		1	-	-	-
<b>ESTADISTICOS</b>	<b>Confabilidad</b>		80%	-	-	80%
	<b>Desviacion Estandar</b>		0.35	-	-	-
	<b>Riesgo</b>		-	-	20%	-

Diseño preliminar para AASHTO 2008

Utilizamos el siguiente diseño:

- **PCC (Concreto de Cemento Portland).- Espesor Variable**
- Subbase.- Capa de 4” de espesor
- Subbase A-1-a con CBR 50%
- **Subrasante.- Tipo de suelo variable**
- Clima, utilizaremos el clima de la ciudad de San Luis Estados Unidos

Diseño de Prueba – Propiedades del JPCP

- Losa de 15 pies de largo
- Pasa-juntas de 1” de diámetro para las juntas transversales
- Espacio de 12” entre cada pasa juntas
- Drenaje al borde de la berma

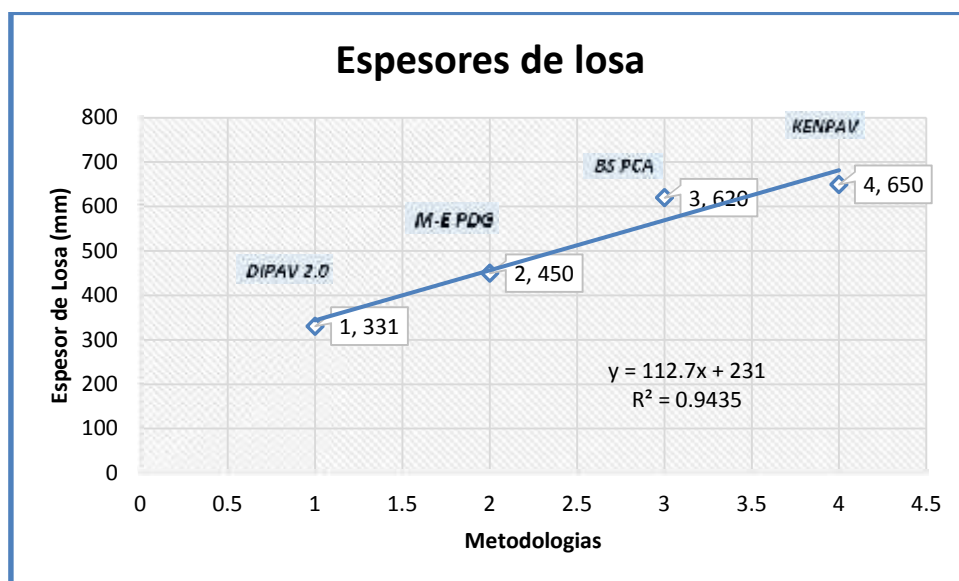
### a.- Primera Comparacion

		<i>K</i>	<i>ESALs</i>	<i>S'c</i>	<i>Espesor</i>
		<i>(MPa/m)</i>	<i>10^6</i>	<i>(MPa)</i>	<i>mm</i>
<i>EMPIRICO</i>	<i>DIPAV 2.0</i>	10	0.5	1	331
<i>MECANICISTA</i>	<i>BS PCA</i>	10	0.5	1	620
	<i>KENPAV</i>	10	0.5	1	650
<i>EMPIRICO MECANICISTA</i>	<i>M-E PDG</i>	10	0.5	1	450

### Valores y variabilidad

	<i>Espesor (mm)</i>	<i>Método</i>
<i>valor máximo</i>	650	KENPAV
<i>valor mínimo</i>	331	DIPAV 2.0

La diferencia mayor es de 319 mm la cual es irreal, esto puede que se haya dado por el analisis que hace cada metodologia. Y la menor diferencia se da entre los metodos mecanicistas BS PCA y KENPAV ya que hay 30 mm, lo cual sigue siendo de importancia.



### Tendencia.-

Como observamos el valor de la correlacion es de 0.9435, lo que nos indica que existe relacion de los resultados de espesores, que va desde el empirico, pasando por el semi empirico hasta llegar a los mecanicistas.

### b.- Segunda Comparacion

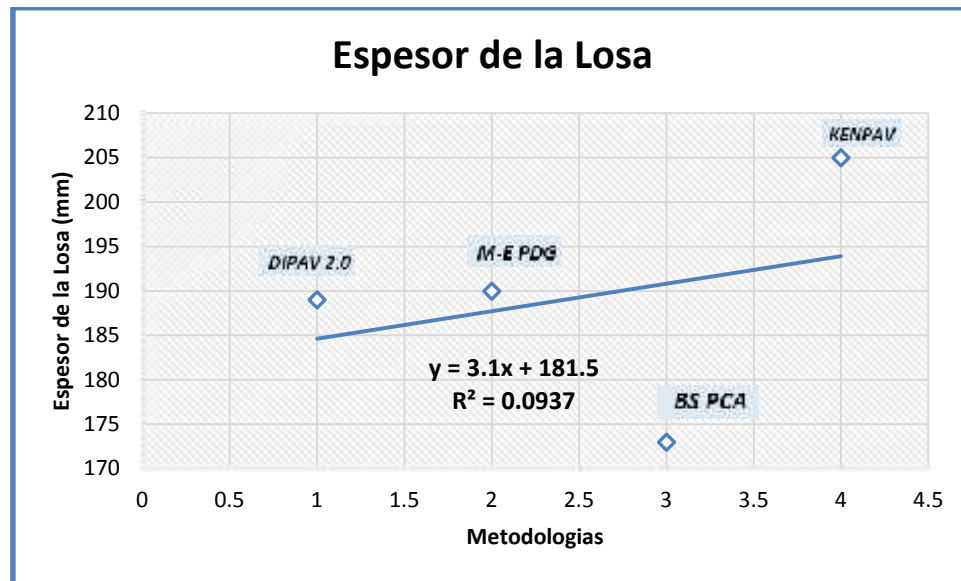
		<i>K</i>	<i>ESALs</i>	<i>S'c</i>	<i>Espesor</i>
		<i>(MPa/m)</i>	<i>10^6</i>	<i>(MPa)</i>	<i>mm</i>
<i>EMPIRICO</i>	<i>DIPAV 2.0</i>	45	5	5	189
<i>MECANICISTA</i>	<i>BS PCA</i>	45	5	5	173
	<i>KENPAV</i>	45	5	5	205
<i>EMPIRICO MECANICISTA</i>	<i>M-E PDG</i>	45	5	5	200

### Valores y variabilidad

	<i>Espesor (mm)</i>	<i>Método</i>
<i>valor máximo</i>	205	KENPAV
<i>valor mínimo</i>	173	BS PCA

La diferencia es de 32 mm. La menor diferencia es entre el metodo AASHTO 2008 y KENPAV ya que tiene una variacion de 5 mm.

Como observamos los valores tienen mucho menor diferencia que el anterior ejemplo.



### Tendencia

Como observamos el valor de la correlacion es de 0.0937, lo que nos indica que no existe ninguna relacion entre los resultados de espesores, pero este se debe a la poca diferencia que hay de espesores entre los metodos

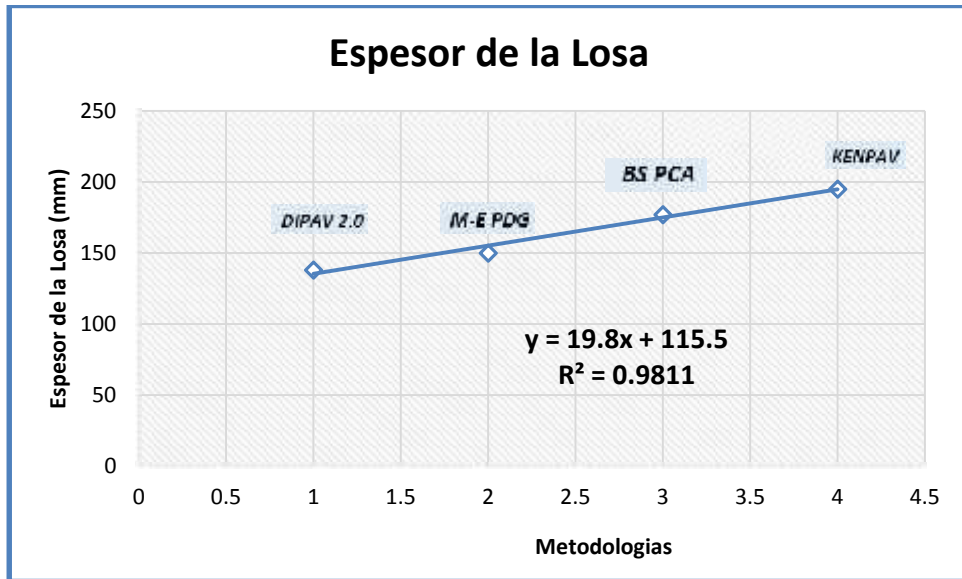
### c.- Tercera Comparacion

	<i>K</i> (MPa/m)	<i>ESALs</i> $10^6$	<i>S'c</i> (MPa)	<i>Espesor</i> mm
<i>DIPAV 2.0</i>	105	20	10	138
<i>BS PCA</i>	105	20	10	177
<i>KENPAV</i>	105	20	10	195
<i>M-E PDG</i>	105	20	10	150

### Valores y variabilidad

	<i>Espesor</i> (mm)	<i>Método</i>
<i>valor máximo</i>	195	KENPAV
<i>valor mínimo</i>	138	DIPAV 2.0

La diferencia es de 57 mm, la cual es la mayor diferencia entre los métodos y KENPAV y el empirico. La menor diferencia se da entre los metodos mecanicistas, al igual que el metodo empirico-mecanicista con el empirico AASTO 93 que es de 12 mm



### Tendencia

Como observamos el valor de la correlacion es de 0.9811, lo que nos indica que existe gran relacion entre los resultados de espesores, que va desde el empirico, pasando por el semi empirico hasta llegar a los mecanicistas.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1.- Conclusiones

Luego de realizar la aplicación práctica de las tres metodologías de dimensionamiento de pavimento rígido con el proyecto estudiado se llegó a las siguientes conclusiones:

- ✓ Primeramente se cumplió el objetivo general de realizar un análisis valorativo sobre las ventajas y desventajas de la aplicabilidad de los métodos empíricos como el AASTHO 93, mecanicista como el PCA 1984 y KENPAV - WESTERGARD y empírico-mecanicista como AASTHO 2008.
- ✓ De acuerdo al proyecto “150 cuadras de Bermejo” podemos establecer las siguientes ventajas y desventajas de la aplicabilidad de los métodos.

<b>METODOLOGIAS</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>EMPIRICOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se completó todos los datos tráfico y estadísticos.</li> <li>-Se calculó el Espesor de la Losa.</li> <li>-Se complementó con datos de Información Adicional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No analizó los daños durante la vida útil del pavimento.</li> </ul>
<b>MECANICISTAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se completó los datos de entrada estructurales.</li> <li>-Se optimizó el espesor de la losa, analizando y comparando la deformación y esfuerzo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se pudo graficar el resultado debido a que es un demo del Software original.</li> <li>-Menor número de datos de entrada</li> </ul>
<b>EMPIRICO-MECANICISTAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se completó los datos de entrada de tipo estructurales específicos.</li> <li>-Se predijo las fallas a lo largo de los 20 años de vida útil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se comparó el clima de Bermejo con la Ciudad de Austin, Texas de los EE UU.</li> <li>-Datos de Tráfico (Nivel 3 – Por defecto)</li> <li>-Resultados no confiables debido a la comparación en nuestro medio.</li> </ul>

✓ Se realizó el dimensionamiento de pavimento rígido con cuatro programas utilizando para su aplicación los datos de un proyecto realizado en el departamento de Tarija, los resultados de espesores obtenido con los programas son los siguientes:

Nombre del Proyecto: 150 cuadras de la Ciudad de Bermejo

	<i>Empírico</i>	<i>Mecanicista</i>		<i>Empírico-Mecanicista</i>	<i>Empirico</i>
	<i>DIPAV 2.0 (mm)</i>	<i>BS PCA (mm)</i>	<i>KENPAV (mm)</i>	<i>M-E PDG (mm)</i>	<i>DARWin (mm)</i>
Losa concreto	171	175	205	200	<b>220</b>
Subbase	125	125	125	125	<b>200</b>

✓ Observamos que los resultados con los que se hizo el diseño del pavimento son mayores a los halladas en esta investigación, tanto en la base como en la losa de concreto, esto se puede dar porque la capa subbase precisa de una compactación previa y los espesores recomendables debido a la experiencia en el medio son de 200 mm, y en el espesor de losa pudo haber tomado en cuenta un factor de seguridad, para poder mayorar dicho espesor.

✓ Con el análisis de las variables de entrada se llegó a la conclusión que los parámetros con mayor relevancia en el dimensionamiento de pavimento rígido para la metodología AASHTO 93 son: el tráfico y la confiabilidad; ya que cuando se varía el valor de uno de estos parámetros el resultado espesor de losa tiende a variar, pero el parámetro que causa mayor relevancia es el estadístico, ya que si uno varía de 80 % a 95 % el valor de este parámetro, el resultado de espesor de losa se incrementa de 15 mm a 25 mm.

✓ En la metodología mecanicista PCA 84 solo se cuenta con tres parámetros de entrada que podría ser el de mayor relevancia, el tráfico; ya que este programa está diseñado para contemplar los sobrepesos que lleva cada eje.

✓ En la metodología mecanicista KENPAV la variables de mayor relevancia son: la variable del tráfico, que son solo camiones mayores o iguales a 13 toneladas de peso,

y de los datos estructurales, la variable estadística del riesgo, expresada en porcentaje, que representa la probable degradación de las capas que lo conforman

- ✓ En el método mecanicista KENPAV es difícil hallar el tráfico promedio diario anual, ya que para obtenerlo se debe realizar un conteo riguroso de camiones que pesen igual o más de 13 toneladas, si se lo quisiera realizar de manera óptima.
- ✓ En el método empírico-mecanicista AASHTO 2008, los parámetros de entrada se hacen mucho más rigurosos puesto que la mayoría de los datos necesarios son horarios, estos ayudan a determinar el comportamiento del pavimento durante su vida útil, pero al igual que el método empírico AASHTO 93, los parámetros más influyentes son los de tráfico y los de confiabilidad.
- ✓ En el procesamiento de acuerdo a la investigación realizada tenemos las siguientes conclusiones:
- ✓ Los procesamientos son únicos ya que son basados en distintas teorías y modelos matemáticos:

<i>empírico</i>	<i>mecanicista</i>		<i>empírico-mecanicista</i>
<i>DIPAV 2.0</i>	<i>BS PCA</i>	<i>KENPAV</i>	<i>M-E PDG</i>
<i>ecuación general guía AASHTO 93</i>	<i>Método de Elemento Finitos</i>	<i>Método Racional</i>	<i>Predecir fallas a los largo de la vida útil basado en experiencia y modelos matemáticos</i>

- ✓ De acuerdo a los resultados podemos observar que la metodología mecanicista KENPAV es la más conservadora, ya que tiene una diferencia de 40 mm con respecto a su homólogo, la mayor diferencia es con el programa DIPAV 2.0 que son 44 mm, lo cual es de importancia, ya que representa de un 20 a 15% del espesor dado y a su vez esto representa costo.

- ✓ El método KENPAV aparte de darnos como resultado el espesor, también nos otorga deformaciones admisibles del concreto y la subbase, como las aplicadas a las mismas capas.
- ✓ El método empírico mecanicista es el que nos ofrece mejores resultados, ya que analiza las fallas más comunes en un pavimento rígido durante toda su vida útil, entonces nos da un comportamiento casi real de lo que sucederá durante el periodo de vida útil de la estructura
- ✓ El método empírico-mecanicista precisa de datos climáticos puntuales por lo que se hizo una comparación con la ciudad de Austin, Texas de los Estados Unidos con la ciudad de Bermejo a la cual pertenece el proyecto de acuerdo a datos de precipitación media mensual y anual y de temperatura a partir del año 2008 hasta el año 2012.
- ✓ Fue muy difícil hacer la comparación de clima entre las ciudades ya que el clima en cada ciudad es único, por lo tanto eso solo fue una aproximación la cual nos da un bajo porcentaje de confiabilidad en el método, por lo que podemos decir que este método no es aplicable en nuestro medio a pesar de todas las ventajas en datos de entrada y resultados que ofrece.
- ✓ Se puede concluir que el método empírico AASHTO 93 en su versión DIPAV 2.0 es el de mayor confiabilidad, debido al análisis que hace de predicción en la serviciabilidad como también tiene mayores datos de entrada lo cual lo hace mas confiable que los demás métodos.

## **6.2.- Recomendaciones**

A continuación se detallan algunas recomendaciones:

- ✓ Primeramente se recomienda que antes de realizar el diseño de espesor de losa utilizando alguno de las metodologías se debe verificar todos los valores introducidos de los parámetros de entrada antes de realizar el diseño, y así poder

obtener el espesor de losa buscado para un grupo de parámetros de entrada de un proyecto en particular.

- ✓ Para realizar un diseño óptimo se recomienda que se debe tener toda la información del proyecto, para que la adopción de los valores de los parámetros de entrada que se adopten sea de forma óptima; como por ejemplo si las losas llevaran pasajuntas, con esta información adoptamos el valor del parámetro coeficiente de transferencia de carga.
- ✓ Para realizar el diseño de espesor de losa con los métodos mecanicistas tanto KENPAV como PCA 84 se recomienda siempre adoptar como valor de espesor de losa inicial 200 mm ya que este valor es un valor promedio de diseños de losa de pavimento rígido y con se puede comenzar el análisis del diseño de espesor de losa.
- ✓ Se recomienda no utilizar el método AASHTO 2008 debido a la falta de una base de datos tanto climatológicas como de tráfico.