

## INTRODUCCIÓN

### 1. JUSTIFICACIÓN

Las deformaciones son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de la circulación de los vehículos, exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento.

Las deformaciones en los pavimentos es uno de los tipos de deterioro, más preocupante dentro del estudio del comportamiento de los pavimentos, ya que dichas deformaciones contribuyen a la ruptura y agrietamiento de la carpeta asfáltica, ocasionando así que el pavimento aumente el costo operativo.

Por esta razón existe la urgente necesidad de realizar un estudio de nuevas alternativas de diseño de pavimentos, que considere no sólo un criterio de resistencia sino también un criterio de la deformación permanente que sufren los pavimentos, debido a los diferentes tipos de rodadura.

Se justifica también este trabajo, porque a nivel de grado se estudia muy poco el comportamiento de los pavimentos respecto a la relación esfuerzo-deformación, el análisis que hagamos nos permitirá encontrar resultados que nos muestren qué tanto influye las diferentes capas de rodadura en la deformación de los pavimentos, y como minimizar dichas deformaciones.

Por último se calculará las deformaciones de los pavimentos debido a los diferentes tipos de rodadura, con estos resultados se podrá tomar una mejor decisión en cuanto a la elección del tipo de pavimento, con lo cual se podrá minimizar futuros deterioros, rupturas de los pavimentos, por causa de las deformaciones, y así también minimizar los costos de mantenimiento en las carreteras.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Realizar el análisis de la influencia que ocasiona el tipo de rodadura en la deformación de los pavimentos flexibles y rígidos, (poniendo mayor énfasis a los pavimentos flexibles).

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar los conceptos fundamentales sobre la deformación de pavimentos.
- Analizar las características y propiedades de diferentes tipos de rodadura.
- Realizar un análisis teórico y el cálculo de esfuerzos y deformaciones en diferentes tramos de la red vial departamental del departamento de Tarija, para cada tipo de rodadura.
- Aplicar a este análisis un programa computacional (kenpav), para el cálculo de las deformaciones.
- Analizar la influencia del tipo de rodadura VS deformación.
- Comparación entre las deformaciones del pavimento flexible y rígido.
- Realizar una valoración de los resultados.
- Establecer conclusiones y recomendaciones.

## **3. ALCANCE**

Para el desarrollo del presente estudio denominado “ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE RODADURA EN LA DEFORMACIÓN DE LOS PAVIMENTOS EN LA RED VIAL DEPARTAMENTAL”, se realizará una

introducción donde se explicara los antecedentes referidos al tema, justificando e indicando la metodología que se seguirá para conseguir los objetivos propuestos.

Realizaremos un estudio de los aspectos generales del diseño de pavimentos por el método racional, para tener una idea más clara sobre los parámetros que influyen en la deformación.

La información requerida para este estudio se obtendrá de algunos proyectos de la red vial departamental de nuestro departamento, en base a esos datos introduciremos al programa (KENPAV) y realizaremos un análisis estadístico de las deformaciones debido a distintos pavimentos en diferentes tramos.

También se hará un análisis del comportamiento de los pavimentos flexibles y rígidos, aunque la orientación mayor será a los pavimentos flexibles, con diferentes tipos de rodaduras, para ello se aplicará un modelo matemático que utiliza el programa KENPAV. Calculando así los esfuerzos y deformaciones.

Se mostrará gráficamente los resultados y se podrá observar el comportamiento que sigue la estructura del pavimento, con respecto a la variabilidad de la capa de rodadura. Finalmente realizaremos una valoración de todos los resultados, con lo que se tendrá un criterio claro, como minimizar las deformaciones en los pavimentos y evitar futuros deterioros en su vida útil de diseño.

## CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

### 1.1. ASPECTOS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS

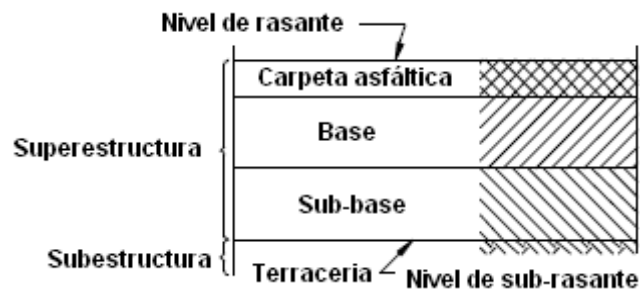
#### 1.1.1. DEFINICIÓN

Los pavimentos se definen como un conjunto de capas superpuestas horizontalmente de diferentes tipos de materiales seleccionados y adecuadamente compactados, con espesores diferentes, estas estructuras estratificadas se apoyan en la subrasante obtenida por el movimiento de tierras, son las encargadas de recibir en forma directa las cargas del tráfico y transmitir las a los estratos inferiores en forma disipada, durante un periodo de varios años deben funcionar eficientemente sin deterioros que afecten a la seguridad y comodidad de los usuarios o a la propia integridad del pavimento.

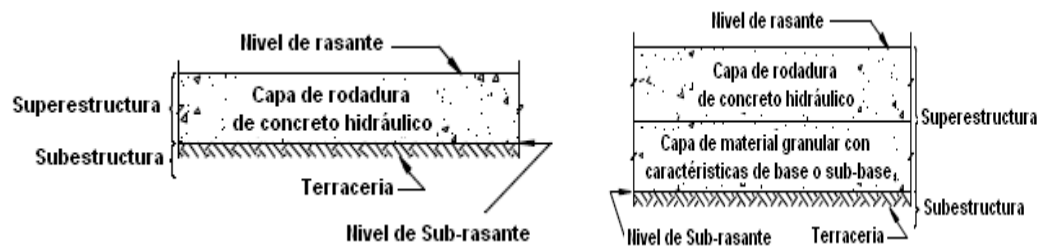
#### 1.1.2. TIPOS DE PAVIMENTOS

En general los pavimentos se dividen en dos tipos:

- Pavimentos flexibles
- Pavimentos rígidos o de concreto hidráulico



**Figura 1 Componentes de un pavimento flexible**



**Figura 2 Componentes de un pavimento rígido**

### 1.1.2.1. PAVIMENTOS FLEXIBLES

Los pavimentos flexibles están formados por una serie de capas (multicapa), los cuales están diseñados para absorber y disipar los esfuerzos generados por el tráfico, por lo general estas estructuras poseen capas de mejor calidad cerca de la superficie donde las tensiones son mayores. Tradicionalmente un pavimento flexible trabaja distribuyendo la carga aplicada hasta que llegue a un nivel aceptable para la subrasante. Este tipo de pavimentos lo conforman una capa bituminosa apoyada sobre una capa de base que puede ser piedra partida, grava bien gradada o materiales estabilizados (con cementos, cal o asfalto) y una de sub-base con material de menor calidad.

Los pavimentos flexibles presentan muy poca resistencia a la flexión, resulta más económico en su construcción inicial que el rígido, tiene un periodo de vida entre 10 y 15 años, pero tiene la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil, por lo que su mantenimiento es más costoso que el pavimento rígido.

### 1.1.2.2. PAVIMENTOS RÍGIDOS O DE CONCRETO HIDRÁULICO

Los pavimentos rígidos son aquellos que están compuestos por una losa de concreto hidráulico, que va asentado directamente sobre la subrasante o terreno de fundación, sin embargo cuando el suelo que forma las terracerías es de mala calidad, es necesario colocar bajo la losa una capa de sub-base, el cual será de un material seleccionado.

En un pavimento rígido la losa de concreto hidráulico suele constituirse, al mismo tiempo, la capa de rodamiento y el medio para soportar y distribuir las cargas generadas por el tránsito.

Los pavimentos rígidos en algunos casos presentan un armado de acero, cuya función es minimizar y mantener cerradas las fisuras que aparezcan en la losa.

El pavimento rígido posee una resistencia considerable a la flexión, que les permite sostener una acción como de viga a través de irregularidades menores en el material subyacente. Así, esas irregularidades pueden no reflejarse en el pavimento.

Los pavimentos rígidos tienen un costo inicial más elevado que el flexible, pero bien diseñados y construidos tienen una larga vida de servicio, su periodo de vida varía entre 20 y 40 años, y en general su mantenimiento es menos costoso que el de los pavimentos flexibles.

### **1.1.3. COMPONENTES DE LOS PAVIMENTOS**

#### **1.1.3.1. PAVIMENTOS FLEXIBLES**

Los pavimentos flexibles están compuestos por las siguientes capas estructurales: subrasante o afirmado, la sub-base, la base y la capa de rodadura.

##### **1.1.3.1.1. CAPA SUBRASANTE**

La subrasante es el nivel de la superficie del terreno natural ubicado a lo largo del alineamiento horizontal del pavimento, luego de haberse ejecutado el movimiento de tierras. Esta capa es muy importante para los pavimentos y constituye su cimiento, de su capacidad de soporte depende el espesor del pavimento.

Para diseñar adecuadamente un pavimento, se debe realizar una serie de estudios de suelos de material de la subrasante, como cuyos resultados se podrán clasificar por su calidad en:

- Buenas
- Regulares
- Pobres

Para determinar si una subrasante corresponde a una de estas categorías, debemos conocer su granulometría, plasticidad y principalmente su CBR.

#### **1.1.3.1.2. CAPA SUB-BASE**

La sub-base es la capa que se construye directamente sobre la subrasante y está constituida por un material de mejor calidad, en términos de la granulometría como ser características plásticas y de resistencia. Cuando la calidad del material de la subrasante cumple con los requisitos del material de la sub-base, se puede omitir este componente. Las funciones que cumple la capa sub-base es:

- a) Reducir el costo de pavimento disminuyendo el espesor de la capa base, que se construye generalmente con materiales de mayor costo por sus características físicas de mayor exigencia.
- b) Trabajar como una capa drenante del pavimento.
- c) Proteger a la capa base aislándola del material subrasante, que por sus características pueden tener cambios volumétricos perjudiciales.
- d) Controlar la ascensión capilar del agua proveniente de las napas freáticas.

### **1.1.3.1.3. CAPA BASE**

La capa base es la capa estructural del pavimento, que se construye sobre la sub-base, debe estar formada por materiales de mejor calidad que la sub-base. Su función que cumple en el paquete estructural es muy importante:

- a) Tener en todo tiempo la resistencia estructural para soportar las presiones producidas por el tráfico vehicular y transmitirlas a las capas inferiores en forma disipada.
- b) Tener el espesor necesario para que dichas presiones al ser transmitidas a la sub-base o a la subrasante no excedan la resistencia estructural de éstas.
- c) No presentar cambios volumétricos perjudiciales al variar las condiciones de humedad.

Podemos decir que esta capa es la más importante del paquete estructural ya que es la encargada de recibir en forma directa todas las cargas del tránsito por lo que debe tener una mayor resistencia que las otras capas.

### **1.1.3.1.4. CAPA DE RODADURA**

La capa de rodadura es la capa superior del pavimento y se construye inmediatamente arriba de la capa base, tiene como objetivo proporcionar una superficie de rodamiento adecuada que permita el tránsito cómodo de los vehículos y la protección del pavimento, evitando la infiltración del agua superficial hacia las capas inferiores, impidiendo así que el agua disminuya su capacidad para soportar las cargas. Cuando tiene un espesor mayor 3” ayuda a soportar la carga de tráfico. Además, evita que se desgaste o se desintegre la base debido al tránsito de los vehículos.

### **1.1.3.2. PAVIMENTOS RÍGIDOS**

Los pavimentos rígidos se componen fundamentalmente de una losa de concreto hidráulico, con frecuencia también de una capa sub-base que se ubica sobre la subrasante.

Las dos capas inferiores a la losa, sub-base y subrasante cumplen las mismas funciones mencionados ya en los pavimentos flexibles, por lo que sólo describiremos la losa de concreto hidráulicos.

#### **1.1.3.2.1. LOSA DE CONCRETO HIDRÁULICO**

Es la capa superior de la estructura del pavimento, por lo que se constituye al mismo tiempo en la capa de rodadura, esta capa debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que la capacidad de la subrasante, dado que no tiene capa base. En general se puede indicar que la losa de concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura del pavimento.

Existen tres tipos de pavimentos rígidos:

#### **1.1.3.2.2. PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO SIMPLE**

Este tipo de pavimento no contiene armadura en la losa, ni espigas para transferir las cargas. Sin embargo, con frecuencia se usan estribos de acero para tener un efecto de bisagra en las juntas longitudinales, y para evitar que se abran esas juntas, el espaciamiento entre juntas (transversales) es relativamente cortas (de 10 a 20 pies), por lo que se reduce la cantidad de agrietamiento. Los Pavimentos de concreto simple

se usan principalmente en carreteras de bajo tránsito, o cuando se usan suelos estabilizados con cemento como sub-base.

#### **1.1.3.2.3. PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO CON REFUERZO SIMPLE**

Llevan armadura distribuida en la losa y espigas para transferir las cargas de tránsito por medio de las juntas, a efecto de controlar y mantener cerradas las fisuras de contracción. Las juntas están separadas a mayores distancias, que van (de 30 a 100 pies). En toda la losa se usa acero de temperatura, también se suelen usar varillas de estribo en las juntas longitudinales.

#### **1.1.3.2.4. PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO CON REFUERZO CONTINUO**

Este tipo de pavimento tiene armadura continua longitudinal y no tiene juntas transversales, excepto las de construcción o las de expansión. La armadura transversal es opcional en este caso. Estos pavimentos tienen más armadura que las juntas armadas y el objetivo de esta armadura es mantener un espaciamiento adecuado entre fisuras y que éstas permanezcan cerradas.

### **1.1.4. TRÁFICO**

#### **1.1.4.1. INTRODUCCIÓN**

El servicio que presta una carretera a los usuarios, debe permitir una circulación razonablemente segura y cómoda durante el periodo de su vida útil, por esta razón es

necesario realizar un estudio de tráfico que nos permita determinar las clases de vehículos que transitan o van a transitar por una determinada carretera.

#### **1.1.4.2. VOLUMEN DE TRÁFICO O TRÁNSITO**

Para el diseño de estructuras de pavimentos es necesario conocer el número de vehículos que pasan por un punto dado. Para el efecto se realizan estudios de volúmenes de tránsito, los cuales pueden variar desde los más amplios en un sistema de carreteras, hasta el recuento en lugares específicos, tales como: puentes, túneles o intersecciones de carreteras.

Estos aforos se realizan con el objeto de:

- Determinar la composición y volumen de tránsito en un sistema de carreteras.
- Determinar el número de vehículos que transitan en cierta zona o que circulan dentro de ella.
- Evaluar índices de accidentes.
- Servir de base para la clasificación de carreteras.
- Datos útiles para la planeación de rutas y determinación de proyectos geométricos.
- Proyectar sistemas de control de tránsito.
- Elaborar sistemas de mantenimiento.
- Establecer prioridades y técnicas de construcción.
- Determinar el tránsito futuro, etc.

Podemos decir que el conocimiento del tipo de tránsito que circula en una carretera, es quizás la variable de mayor importancia para calcular los espesores de los pavimentos, ya que se podrá conocer las diferentes cargas que actúan en el mismo, produciendo a su vez diferentes tensiones y deformaciones en los pavimentos.

### **1.1.5. TIPOS DE CAPAS DE RODADURA**

En el diseño de pavimentos, existen varios tipos de capas de rodaduras, que pueden ser: tratamiento superficiales, arena - asfalto, macadam asfáltico, concretos asfálticos, sellos asfálticos (lechadas asfálticas y microaglomerados).

#### **1.1.5.1. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES**

Los tratamientos superficiales, consisten en la aplicación de material asfáltico sobre la superficie preparada de base, el riego y compactación del material pétreo y graduado que sirve de cubierta y se colocará sobre el material asfáltico en diferentes capas alternándolas. Existen tres tipos de tratamientos superficiales y son:

##### **1.1.5.1.1. TRATAMIENTO SUPERFICIAL SIMPLE**

Consiste en la aplicación de una película de asfalto sobre la superficie de una capa de base preparada, seguida de la extensión y compactación de una sola capa de agregado.

#### **1.1.5.1.2. TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE**

El tratamiento superficial doble es la aplicación consecutiva de dos tratamientos superficiales simples que pueden ser de características diferentes.

#### **1.1.5.1.3. TRATAMIENTO SUPERFICIAL TRIPLE**

Este tipo de tratamiento consiste en realizar tres riegos de producto asfáltico sobre la capa base preparada, el procedimiento es dar primeramente un riego de producto asfáltico e inmediatamente se cubre con material pétreo y se compacta, dos a tres días después se coloca una carpeta de dos sobre ésta, quedando así terminado el tratamiento superficial triple.

#### **1.1.5.2. ARENA – ASFALTO**

Este tipo de capa de rodadura se recomienda usar en calzadas que tienen tránsitos bajos  $T_1$  y  $T_2$  en regiones ricas en arenas o en donde se dispone de un stock de arenas provenientes de la trituración. Se utilizan espesores bajos (3 a 4 cm.). Se pueden solucionar los riegos de deslizamientos colocando de 4 a 5 kg/m<sup>2</sup> de granulares duros de talla 10/14.

#### **1.1.5.3. MACADAM ASFÁLTICO**

El macadam o de penetración es una carpeta asfáltica que consiste de capas sucesivas de piedras progresivamente más pequeñas de abajo hacia arriba, limpias y angulosas.

Cada capa se extiende y se acuña mediante compactación por vibración después de lo cual se baña con producto asfáltico.

Es necesario contar con una buena base ya que siendo el macadam asfáltico una carpeta que presenta gran porcentaje de vacíos, principalmente en la parte de la capa, si la base se reblandece, el paso constante de los vehículos obligará a que la base se incruste en la carpeta provocándose una deformación perjudicial.

#### **1.1.5.4. CONCRETOS ASFÁLTICOS**

Los concretos asfálticos son altamente elaborados en plantas estacionarias y se utilizan para las capas de rodadura que soportan tránsitos altos  $T_4$  y  $T_5$ . Se debe asegurar que posean un excelente soporte y que la base esté conformada con un material tratado poco deformable; el objetivo es ejecutar la calzada progresivamente y que adquiera maduración bajo el tránsito.

#### **1.1.5.5. SELLOS ASFÁLTICOS**

Es el revestimiento con emulsiones asfálticas y agregado fino, destinado principalmente a impermeabilizar una superficie asfáltica existente, por medio del llenado de los vacíos y grietas y/o la desintegración de superficies asfálticas desgastadas y mejorar su resistencia contra el deslizamiento aumentando la durabilidad del pavimento. Se puede mencionar dos tipos de sellos asfálticos: La lechada asfáltica y los microaglomerados.

#### **1.1.5.5.1. LECHADA ASFÁLTICA**

Consiste en una mezcla de agregados pétreos, emulsión asfáltica, agua y aditivos, que proporcionan una mezcla homogénea que se aplica sobre un pavimento, como un tratamiento de sellado con el fin de impermeabilizarlo; proporcionando una textura resistente, antideslizante y adherida firmemente a la superficie.

#### **1.1.5.5.2. MICROAGLOMERADOS**

Los microaglomerados, consiste en una mezcla de emulsión catiónica de asfalto modificado con polímeros, agregados minerales, rellenos, agua y otros aditivos que son tendidos sobre una superficie pavimentada, evitando la desintegración de superficies asfálticas desgastadas y mejorando su resistencia contra el deslizamiento aumentando su durabilidad.

## **1.2. ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN LOS PAVIMENTOS**

### **1.2.1. FATIGA DE LOS MATERIALES**

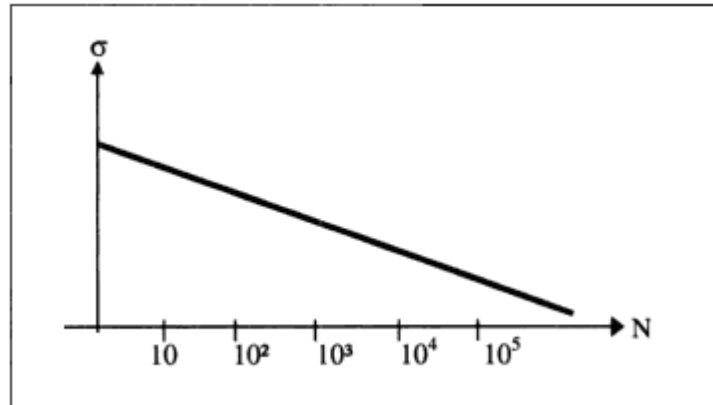
En todos los métodos de diseño de pavimentos se acepta que durante la vida útil de la estructura se pueden producir dos tipos de fallas, la funcional y la estructural. La falla funcional se deja ver cuando el pavimento no brinda un paso seguro sobre él, de tal forma que no transporta cómoda y seguramente a los vehículos. La falla estructural está asociada con la pérdida de cohesión de algunas o todas las capas del pavimento de tal forma que éste no puede soportar las cargas a la que está sometido. No necesariamente las dos fallas se producen al tiempo; en este caso se hará referencia a la falla estructural.

La falla estructural en un pavimento se presenta cuando los materiales que conforman la estructura, al ser sometida a repeticiones de carga por acción del tránsito, sufren un agrietamiento estructural relacionado con la deformación o la tensión horizontal por tracción en la base de cada capa; en este sentido la falla relaciona la deformación o la tensión producida con el número de repeticiones admisibles; esto se denomina falla por fatiga o sea por repeticiones de carga.

Estos fenómenos que se producen en el pavimento durante su funcionamiento, pueden ser modelados en el laboratorio haciéndose los llamados ensayos de fatiga; el agrietamiento que se produce en los materiales cuando se hacen las pruebas de laboratorio sobre las muestras de materiales o a escala natural, se asocia con la respuesta resiliente (recuperable) del pavimento ante las cargas dinámicas; en estos ensayos se ha determinado que las grietas se propagan de la base de cada capa hacia arriba.

Los materiales que forman parte de la estructura se consideran homogéneos e isotrópicos y se supone que las capas tienen una extensión infinita en sentido horizontal.

Podemos decir que la curva de Wohler nos muestra el comportamiento de la fatiga de un material que consiste en someter una probeta a sollicitaciones repetitivas e idénticas para determinar el número de repeticiones que la llevan a la ruptura de dicho material, la curva es:



**Figura 3 Curva de Wohler**

Donde:

$N$  = es el número de ciclos para su ruptura del material o número de repeticiones de carga para su ruptura del material.

$\sigma$  = Esfuerzo aplicado sobre el material

La curva de Wohler podemos decir que es un punto de partida útil para el diseñador ya que nos muestra:

- **El límite de fatiga**, es la aplicación de  $N$  ciclos, donde existe un valor de esfuerzo límite, por debajo del cual la rotura por fatiga no ocurrirá.
- **La vida de fatiga**, es el número de ciclos (o tiempo) que un material puede resistir al esfuerzo aplicado antes de romperse.

En algunos materiales, como las bases bituminosas, no tienen límite de fatiga, y puede haber falla por fatiga en cualquier valor de la amplitud de la sollicitación.

## **1.2.2. COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS**

Para el diseño de carreteras, es importante conocer el comportamiento que tienen los diferentes suelos al aplicar las cargas de los vehículos, para este propósito podemos dividir en tres partes importantes:

- a) una identificación geotécnica, que permita aproximar el comportamiento predecible del suelo al comportamiento general de una familia conocida. Esta etapa se fundamenta en la clasificación de los suelos.
- b) Un estudio de los parámetros de estado, pues para una familia de suelos existen parámetros característicos de su comportamiento, por ejemplo el proctor y el CBR.
- c) Una evaluación de la capacidad portante, que va a depender del contenido de agua, apoyado también por CBR.

### **1.2.2.1. LEYES DE COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS SUELOS**

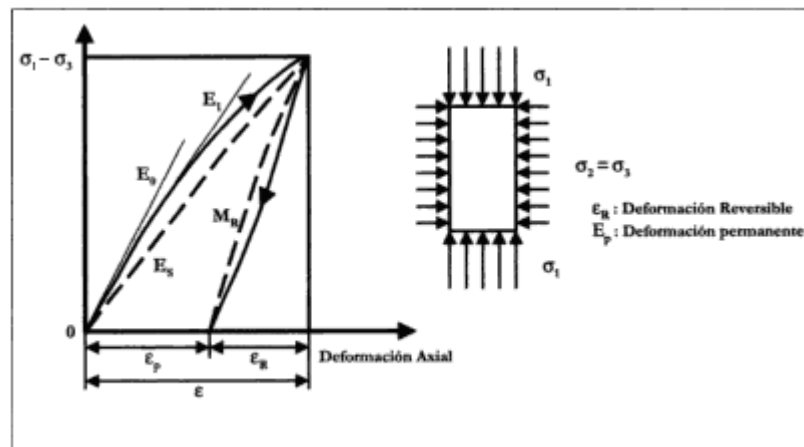
La ley de comportamiento de un material está ligada al estado de esfuerzos y deformaciones. Desde este punto de vista el comportamiento de un suelo se analiza en el laboratorio a través de (ensayos triaxiales) o directamente sobre el terreno a través de (ensayos de placa).

#### **1.2.2.1.1. ANÁLISIS EN EL LABORATORIO (ENSAYOS TRIAXIALES)**

Este análisis de laboratorio (ensayo triaxial), consiste en construir una probeta cilíndrica correspondiente a una muestra de suelo no tratado o tratado, remodelada la cual se confina en una celda triaxial, que permita aplicar una variedad de presiones de

confinamiento a la muestra con el objeto de simular las condiciones al que estará sometido el suelo como parte sustentable de la estructura del pavimento. Luego, a través de un adecuado sistema de aplicación de carga, se somete a la probeta a un gran número de pulsos de magnitudes y duración determinada. Este ensayo nos permite determinar cuatro módulos distintos los cuales nos ayudarán a definir el comportamiento de un determinado suelo.

- El módulo tangente en el origen,  $E_0$
- El módulo tangente para un valor intermedio de la deformación,  $E_t$
- El módulo secante,  $E_s = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon}$
- El módulo resiliente,  $M_R = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_r}$



**Figura 4 Definición de diferentes módulos de deformación**

Donde:

$\sigma_1$  = Esfuerzo vertical total

$\sigma_3$  = Esfuerzo de confinamiento horizontal

$\varepsilon_r$  = Deformación axial (recuperable)

$\sigma_1 - \sigma_3$  = Esfuerzo desviador

El módulo resiliente  $M_R$  es aquel que se caracteriza mejor el estado del suelo y la elasticidad adquirida luego de algunos ciclos de carga. Este módulo se relaciona así con el estado de esfuerzo:

$$M_R = A \sigma_i^\alpha$$

Donde  $\sigma_i$  es el esfuerzo medio (o isotrópico)  $\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$

#### 1.2.2.1.2. ENSAYOS DE PLACA

Los ensayos de placa de carga se utilizan con profusión para comprobar el módulo de deformación de capas de terraplenes y de firmes.

Este tipo de ensayo nos permite apreciar directamente el módulo de un suelo en un ensayo in situ, el cual consiste en cargar una placa circular y medir el desplazamiento vertical bajo la carga. Luego se deduce el módulo utilizando la fórmula de Boussinesq, que relaciona el desplazamiento vertical  $z$ , la presión  $q_0$ , el radio de carga  $a$  y las características del masivo  $E_2$ , su fórmula es:

$$W_0 = q_0 \frac{a}{E_2} (1 - \nu^2)$$

Asumiendo un valor de  $\nu = 0,5$  (coeficiente de Poisson), encontramos la relación:

$$w = \frac{1,5q_0}{E_2} a$$

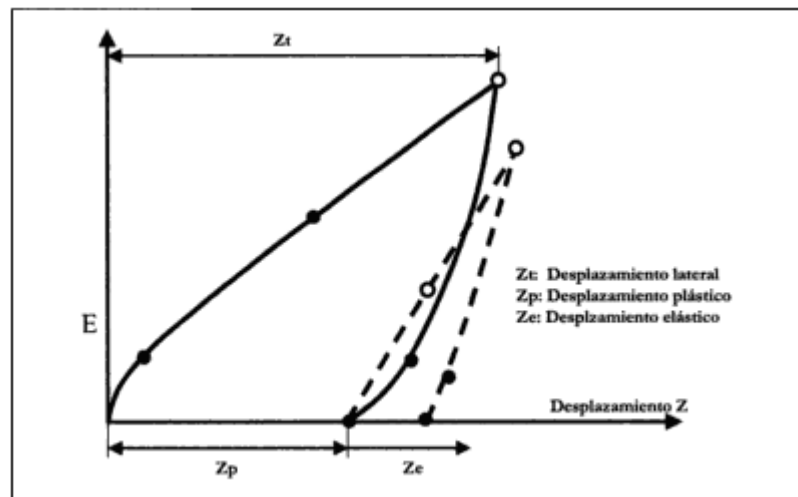
Como en el caso del ensayo triaxial, el desplazamiento total  $w_t$  es la suma de un desplazamiento elástico  $w_e$  y de un desplazamiento plástico (o resonante)  $w_p$ ; se aclara que existe una incertidumbre para determinar el módulo, ya que éste depende

del número de cargas, sobre todo en el primer ciclo. La fórmula para el segundo ciclo es:

$$E_{V_2} = 1,5 \frac{q_0 a}{wt_2}$$

Si se toma en cuenta la relación entre el módulo  $E_{V_2}$  en la segunda carga y el de la primera carga  $E_{V_1}$ , se considera un suelo bien compactado si la relación es inferior a dos.

Las placas utilizadas pueden ser de diámetros de 30, 45, 60, 75 o 100 centímetros, dependiendo del tipo de material.



**Figura 5** Ensayo de placa (dos cargas)

### 1.2.2.1.3. OBTENCIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO A PARTIR DEL CBR

El ensayo CBR (California Bearing Ratio), mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número asociado a la capacidad de soporte. Este ensayo es fácil de realizar, por esta razón muchos autores proponen la utilización del CBR para obtener directamente un

valor del módulo que sea directamente utilizable para el cálculo de espesores mediante el método racional.

Entre las fórmulas que se han propuesto, se pueden citar:

- La fórmula propuesta por Jeuffroy y Bachéeles, que parece pesimista sobre los suelos buenos, cuando se interpretan medidas de deflexión y es:  $E = 6,5CBR^{0,65}$  (MPA).
- La fórmula propuesta Shell, que liga el módulo dinámico al valor CBR. El módulo dinámico es siempre superior al estático, esta fórmula sobrestima el módulo de los suelos y es:  $E = 10CBR$  (MPA).
- La fórmula  $E = 5CBR$  (MPA). Se destaca la gran importancia de este valor de E, ya que es vital en el cálculo del valor límite de  $\varepsilon_z$ , por lo que se sugiere trabajar con esta fórmula.

Es importante mencionar, esta manera de obtener el módulo es mucho más fácil y menos costosa que los ensayos triaxiales y de placa, por lo que se aconseja utilizar.

#### **1.2.2.1.4. LÍMITES DE DEFORMACIÓN ELÁSTICA PARA UN SUELO EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS**

Independientemente de los ensayos de laboratorio, diferentes autores han buscado establecer el límite denominado deformación elástica  $\varepsilon_z$  (o esfuerzo vertical admisible) para un suelo.

Con la ayuda de modelos matemáticos y diversos resultados de ensayos, se ha encontrado que la ecuación límite es:

$$\log \varepsilon_z = A - b \log N \quad \text{ó} \quad \varepsilon_z = AN^{-b}$$

Donde:

$A$  = es una constante que es igual  $[a - \log E_2 + \log(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{lim}}]$

$E_2$  = módulo del masivo o suelo soporte

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{lim}}$  = es el valor que conduce a la ruptura en la primera carga

Finalmente, diferentes autores han propuesto los siguientes valores de los coeficientes

$A$  y  $b$ , quedando las ecuaciones para el cálculo de los límites admisibles de  $\varepsilon_z$ , de la siguiente manera:

Universidad de Nottingham

$$\varepsilon_z = 2,16 \times 10^{-2} N^{-0,28}$$

Fórmula Shell 1977

$$\varepsilon_z = 2,8 \times 10^{-2} N^{-0,25}$$

Fórmula de CRR (Centro de investigaciones viales de Bélgica)

$$\varepsilon_z = 1,1 \times 10^{-2} N^{-0,23}$$

Fórmula LCPC (Francia, para calzadas nuevas)

$$\varepsilon_z = 2,1 \times 10^{-2} N^{-0,24}$$

Otros autores introducen el esfuerzo  $\sigma_z$  sobre el suelo, y su formula es:

$$\text{Heukelom} \quad \sigma_z = \frac{0,006 E_D}{1+0,7 \log N} \quad (E_D : \text{módulo dinámico})$$

$$\text{Fórmula Danesa} \quad \sigma_z = 0,152 \varepsilon N^{-0,307}$$

Estas dos fórmulas pero en realidad introducen  $\frac{\sigma_z}{z}$ , que es aproximadamente igual a  $\varepsilon_z$ .

### 1.2.2.1.5. GRAVAS NO TRATADAS

Este material, al igual que los suelos, su módulo aproximado se obtiene a través de los ensayos de laboratorio (triaxiales) y ensayo de placa.

### 1.2.2.1.5.1. ENSAYO DE LABORATORIO (TRIAXIAL)

Al realizar el ensayo aparece bajo carga una deformación plástica  $\varepsilon_p$  y una deformación elástica (o reversible)  $\varepsilon_R$ . La formula del módulo resiliente  $M_R$ , es:

$$M_R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_R}$$

El módulo resiliente crece con el esfuerzo medio  $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ , según una relación del tipo  $M_R = M_0 \sigma_i^\alpha$ .

El exponente  $\alpha$  decrece con la densidad seca  $\gamma_d$ , es decir el comportamiento es más próximo a un elástico cuando el coeficiente  $M_0$  varía en sentido inverso

El módulo en este tipo de material depende en particular de la distribución granulométrica.

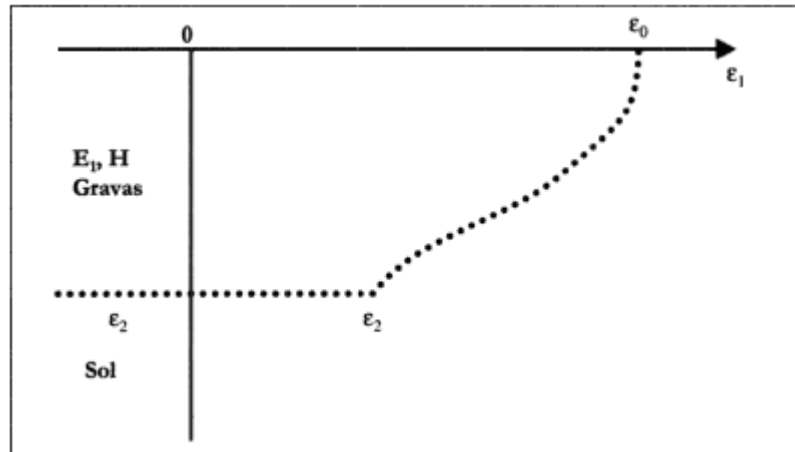
### 1.2.2.1.5.2. ENSAYO DE PLACA

En este tipo de materiales, el ensayo de placa, supone que el masivo de grava sea de espesor finito (es decir un espesor importante en relación de con el radio de la carga), algo que rara vez ocurre cuando se intenta medir directamente el módulo de una grava no tratada y se está en presencia de sistemas multicapas, por lo general.

A través de ensayos triplacas (tres placas) realizados se ha encontrado que el valor del módulo crece un poco con la calidad de la grava (curva granulométrica, limpieza) y con espesor.

Una capa de espesor  $H$  de grava no tratada no tiene módulo propio; se le podrá asociar un módulo  $E_1 = k(H) * E_2$ , en donde  $k(H)$  es una función creciente de la calidad de grava y varía.

$$(2 < k(H) < 4)$$



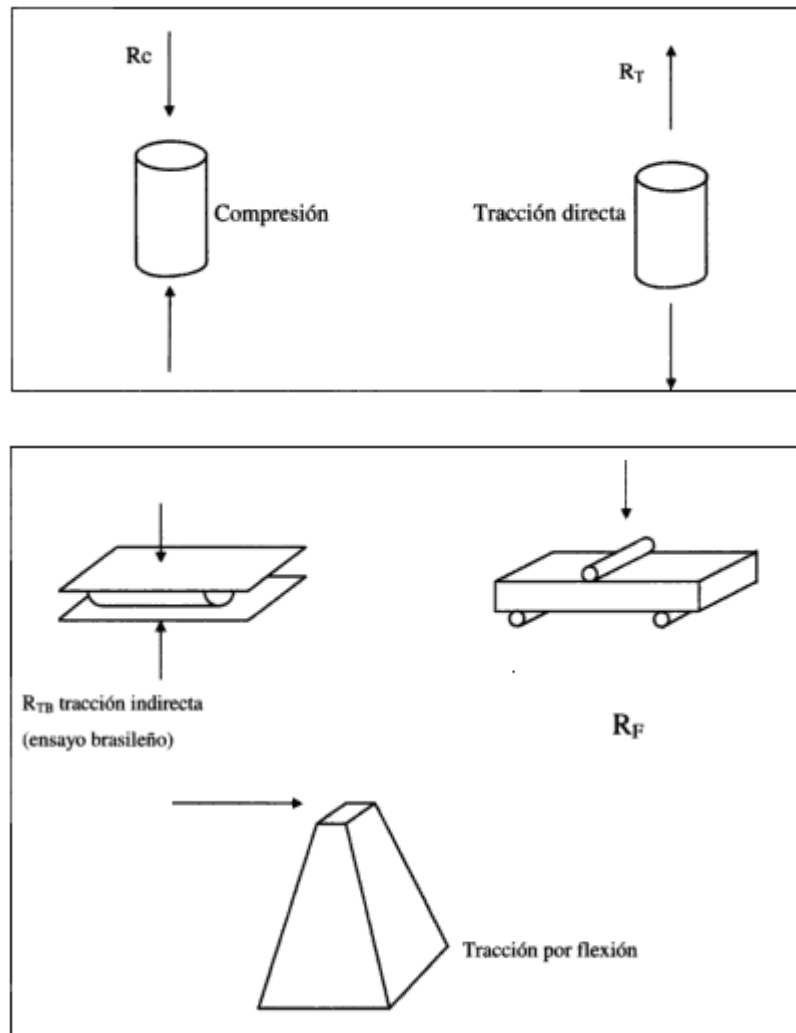
**Figura 6 Variación del modelo sobre el espesor de una capa de grava no tratada**

Ciertos autores, entre ellos Claessen, le da un valor a:

$$k = 0,2H^{0,45}, \text{ donde } H \text{ es dada en mm.}$$

### 1.2.3. ESFUERZO – DEFORMACIÓN EN MATERIALES CON LIGANTES HIDRÁULICOS

La obtención de esfuerzo – deformación en materiales con ligantes hidráulicos se obtiene a través de ensayos, que consisten en someter probetas fabricadas según un proceso normalizado a esfuerzos también normalizados y medir las deformaciones asociadas a estos esfuerzos y los que producen la ruptura. Existen diferentes tipos de ensayos:



**Figura 7** Ensayos para los materiales con ligantes hidráulicos

- a) **Ensayo de tracción directa.** Este ensayo consiste en que el esfuerzo de tracción se ejerce sobre las dos caras planas de una probeta cilíndrica. Donde  $R_T$  es la resistencia a la tracción obtenida.
- b) **Ensayo de tracción indirecta (ensayo de compresión diametral o ensayo brasileño).** En este ensayo se obtiene el esfuerzo de tracción rompiendo una probeta cilíndrica entre dos planos paralelos. Los esfuerzos se ejercen según dos generatrices diametralmente opuestas; donde su notación es  $R_{TB}$ .

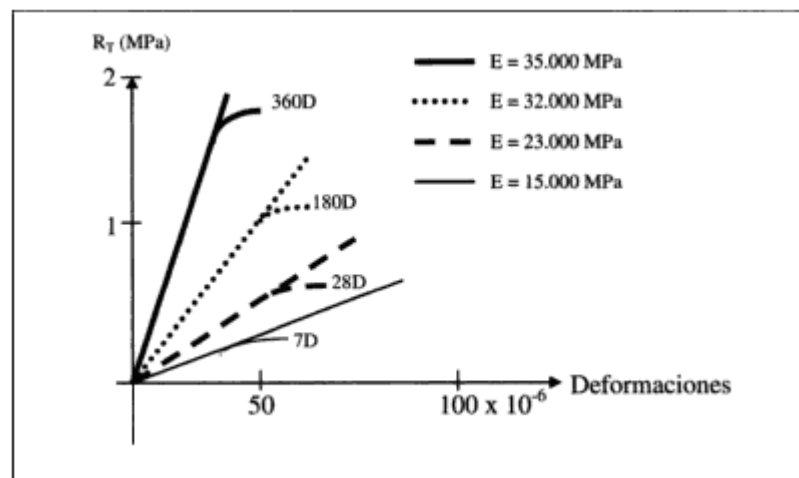
- c) **Ensayo de tracción por flexión.** Podemos decir que se ha estandarizado este ensayo, que consiste en aplicar un esfuerzo en la cabeza de una probeta empotrada en la base. El ensayo de Flexión por tres puntos se utiliza para estudiar el concreto de cemento.

Los materiales tratados con ligantes hidráulicos fraguan lentamente, y los resultados varían con el tiempo, es por eso que debemos considerar lo siguiente:

- Los ensayos no deben hacerse en la jornada de la tarde porque son demorados.
- Los valores obtenidos deben ser representativos del estado final del material porque es lo que importa para el dimensionamiento de calzadas.

Según el material estos ensayos son efectuados a:

- 90 días para materiales tratados con cemento y cenizas volantes sulfocálcicas.
- 180 días para los materiales tratados con escorias, cenizas volantes silicaluminosas y puzolanas-cal.



**Figura 8 comparación entre los resultados de diferentes ensayos**  
( $R_C, R_T, R_F, R_{TB}$ )

Las relaciones entre las resistencias convencionales son relativamente constantes de un material a otro.

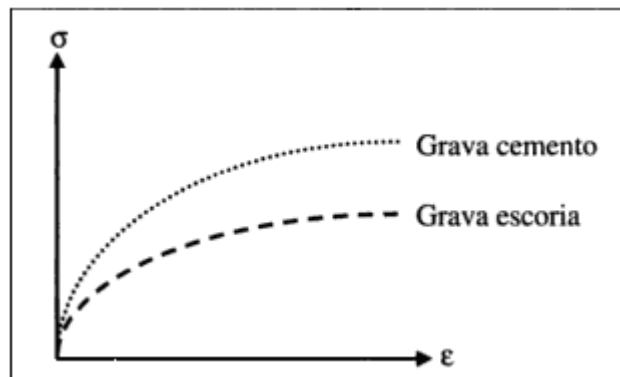
$$\frac{R_C}{R_T} \approx 8 \text{ a } 12; 8 - 10 \text{ arenas tratadas, } 10 - 12 \text{ gravas tratadas}$$

$$\frac{R_F}{R_T} \approx 1,5 \text{ a } 2$$

$$\frac{R_{TB}}{R_T} \approx 1,2 \text{ a } 1,8; 1,2 - 1,5 \text{ arenas tratadas, } 1,4 - 1,8 \text{ gravas tratadas}$$

### 1.2.3.1. CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN – DEFINICIÓN DEL MÓDULO E

Cualquiera que sea el modo de sollicitación mecánica de la probeta, se puede medir la deformación durante el ensayo y trazar desde el inicio del ensayo hasta la ruptura de la probeta, la curva de variación del esfuerzo  $\sigma$  en función de la deformación  $\epsilon$  es:



**Figura 9** Ensayo de compresión de un material tratado con ligantes hidráulicos

El comportamiento de estos materiales es elástico pero no casi siempre lineal. Para poder entender esto mencionamos algunos ejemplos:

- En compresión, las gravas cemento y las gravas cenizas volantes presentan un comportamiento lineal hasta un 60 a 70% de la resistencia a la compresión y las gravas escoria hasta el 40%.

- En tracción, las gravas cemento y las gravas cenizas volantes presentan un comportamiento lineal hasta el 80% de la resistencia a la tracción y las gravas escoria hasta el 60%.
- La toma del valor numérico sobre la curva esfuerzo deformación se efectúa de manera convencional al tercio de la carga de ruptura; esta decisión se debe al hecho de que en la calzada los materiales trabajan a un esfuerzo inferior a la carga de ruptura.

Los órdenes de magnitud de los módulos de diferentes materiales son los siguientes:

- Gravas escorias: 15.000 a 20.000 Mpa
- Gravas cemento: 20.000 a 30.000 Mpa
- Gravas cenizas volantes: 30.000 a 40.000 Mpa
- Arenas Tratadas: 4.000 a 18.000 Mpa

La relación entre el módulo E y la resistencia a la tracción directa  $R_T$  es casi constante.

$$\frac{E}{R_T} \approx 30.000 \text{ para una grava cemento}$$

$$\frac{E}{R_T} \approx 25.000 \text{ para una grava escoria}$$

### 1.2.3.2. ENSAYOS DE FATIGA

En materiales con ligantes hidráulicos, estos ensayos se efectúan en flexión sobre probetas prismáticas trapezoidales, repitiendo en cada una de ellas la aplicación de un nivel de esfuerzo preestablecido, hasta la ruptura de las probetas.

Se deduce la curva de fatiga que correlaciona el esfuerzo  $\sigma$  con el número de ciclos a la ruptura N. Para los materiales con ligantes hidráulicos, la curva de fatiga se presenta muy definida.

Para una recta en coordenadas semilogarítmicas, es decir,  $\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 - a \log N$ ,  $\sigma_0$  es igual a  $R_F$  porque es la ruptura al primer ciclo de carga. El valor de  $a$  es  $1 / 12$  para la mayor parte de los materiales tratados con ligantes hidráulicos, lo que significa que para la aplicación de un esfuerzo  $\sigma$  es igual a la mitad del esfuerzo de ruptura por flexión ( $\sigma = R_F / 2 \sim R_T$ ).

#### **1.2.4. ESFUERZO – DEFORMACIÓN EN MATERIALES ASFÁLTICOS**

Estos materiales presentan la particularidad de que para un nivel de esfuerzo fijo, la deformación depende del tiempo. La analogía mecánica de un sólido elástico hace que intervengan una serie de resortes; se toma para ello un modelo de Kelvin – Voigt.

Se dice que el comportamiento de estos materiales es viscoelástico. Esta propiedad se explica por la dependencia del módulo con la frecuencia de aplicación de la carga: el módulo es elevado cuando se somete el material a una sollicitación rápida (cuando la calzada sufre el paso del vehículo que circula a una velocidad normal (60 km/h)). El módulo es bajo cuando se somete el material a una sollicitación lenta (vehículos que ruedan a velocidades muy bajas o que están estacionados).

La segunda variable que influye sobre el módulo de un material bituminoso es la temperatura, donde con altas temperaturas el módulo disminuye. Los otros parámetros que influyen sobre un concreto asfáltico son su composición, su compacidad y la naturaleza del asfalto.

##### **1.2.4.1. MÓDULO DE DEFORMACIÓN**

En un ensayo de flexión dinámica, el esfuerzo inducido es de forma  $\sigma(t) = \sigma_0 \text{Sen}(\omega t)$ ; tomando en cuenta un carácter viscoelástico del material, la

deformación sufre un retardo sobre el esfuerzo que se traduce por un ángulo de desfase  $\varphi$ . Se tiene que  $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \text{Sen}(\omega t + \varphi)$ , se tiene que en notación imaginaria el módulo se escribe:

$$E^*(i\omega) = |E^*| \exp(i\varphi) = E_1 + iE_2$$

Este módulo complejo se puede caracterizar por dos componentes:  $|E^*| = (E_1^2 + E_2^2)^{\frac{1}{2}}$ , llamado módulo de rigidez.

El ensayo de flexión dinámica que permite definir el módulo se efectúa sobre probetas trapezoidales empotradas en la base.

Se puede obtener la solución “exacta” de las vibraciones de flexión de la viga a perfil trapezoidal a partir del estudio hecho por MacLachlan, para las vibraciones de la viga a perfil triangular.

El resultado al cual se llega es bien complicado cuando se pasa al caso viscoelástico, pues los argumentos se vuelven complejos. Se recurre entonces a la siguiente aproximación de Rayleigh.

#### a) Deformación relativa

Dentro del caso de la aproximación de Rayleigh, la deformación relativa dentro de la fibra extrema de una sección de abscisa “x” está dada para la consola a perfil trapezoidal, por:

$$\varepsilon^+_x = \left( (h_0 - h_1) / (2LR_{(n)}) \right) * \left( (x - a) / x^2 \right) * Z^+_{(a)}$$

Donde el origen de las abscisas es el definido anteriormente.

Dentro de esta expresión:

$h_0$  = Base mayor del trapecio (altura de la sección del empotramiento).

$h_1$  = Base menor (altura de la extremidad libre).

L = altura del trapecio (longitud de la probeta).

$$R_{(n)} = n(2 - n/2) - \log n - 3/2$$

Donde:

$$n = h_1 / h_0 = a / L$$

$Z^+_{(a)}$  = Movimiento de la extremidad libre de la probeta.

### b) El esfuerzo máximo en la fibra más tensionada

$$\sigma_{\text{máx}} = (M * h * 2 * \text{sen}^3 \alpha * \cos \alpha) / (2 * I * 3(\alpha - \text{sen} * \cos \alpha)) = \beta * M * h / (2 * I)$$

Donde:

M = momento flexionante P\*X

X = distancia del origen de coordenadas a la sección más solicitada.

h = largo de la sección de la probeta en la porción más solicitada,  $2X \tan \alpha$ .

$\alpha$  = ángulo que define el ahusamiento de la cuña.

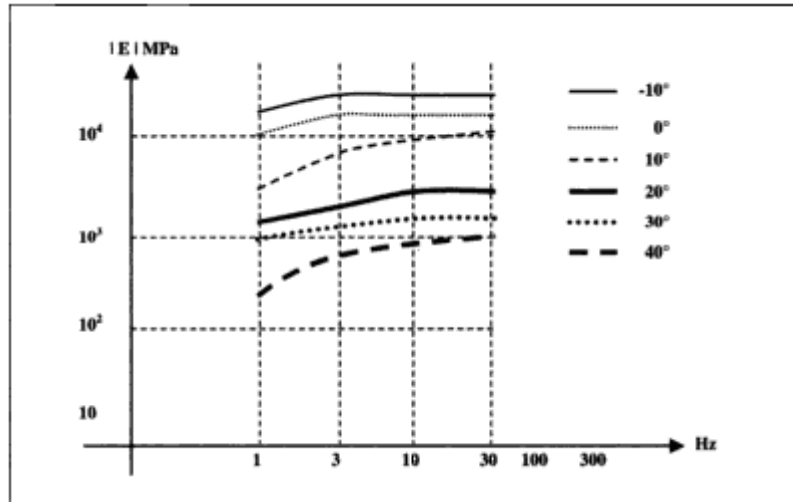
I = inercia de la probeta.

### c) Módulo de rigidez

Para simplificar los cálculos y con base en la teoría según la cual debido al carácter débil de las deformaciones manejadas la parte compleja de dicho parámetro no tiene mayor injerencia sobre los resultados, se tomará:  $E = \sigma_t / \varepsilon_t$ , siendo  $\sigma_t$  y  $\varepsilon_t$  valores reales.

#### 1.2.4.2. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y DE LA FRECUENCIA

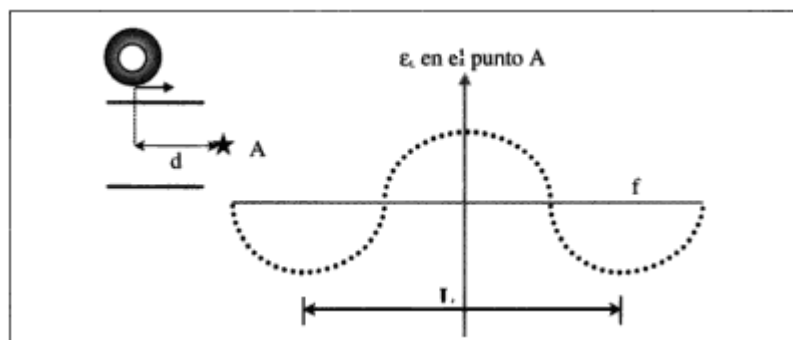
En la representación de las curvas isotérmicas del módulo complejo, aparece sobre ellas que la influencia de la frecuencia de la carga es más fuerte para las altas temperaturas que para las bajas.



**Figura 10 Influencia de la frecuencia de las cargas en el módulo de un material bituminoso**

La influencia de la temperatura sobre el módulo es muy importante porque éste se divide por diez cuando la temperatura varía de 10° a 40 °C.

La frecuencia se calcula a partir del estudio de la variación de la deformación  $\epsilon$  en un punto A en el tiempo  $t$  con el paso de la carga rodante. La frecuencia de la sollicitación depende de la distancia entre los extremos del diámetro de la rueda y de la velocidad de carga.



**Figura 11 Selección de la frecuencia**

Los cálculos se efectúan para 10 Hz, el cual corresponde a un módulo 7.000 Mpa.

**Tabla 1**  
**Valores de la frecuencia y del periodo dependiendo de la velocidad del vehiculo y del tipo de revestimiento**

Velocidad del vehiculo Tipo de revestimiento	10 m/s	25 m/s
Delgado L = 0,50 m	T = 0,05 s f = 20 Hz	T = 0,02 s f = 50 Hz
Grueso L = 2 m	T = 0,25 s f = 5 Hz	T = 0,08 s f = 12,5 Hz

Fuente: diseño método racional (Fredy A. Reyes Lizcano)

Donde L es la longitud de onda.

**Tabla 2**  
**Valores del módulo dependiendo de la frecuencia para una grava bitumen tipo III a 15 °C**

Frecuencia ( Hz)	5 Hz	20 Hz	80 Hz
Módulo ( Mpa)	6.000	8.000	10.000

Fuente: diseño método racional (Fredy A. Reyes Lizcano)

### 1.2.4.3. ENSAYOS DE FATIGA

Estos ensayos se realizan en tracción por flexión sobre probetas trapezoidales empotradas en la base, repitiendo un nivel de esfuerzo o de deformación hasta la ruptura. La temperatura es de 10 °C y la frecuencia de 25 Hz, según normal NF P 98-261-1.

Existen dos clases de ensayos:

#### 1. A esfuerzo constante

El ensayo puede efectuarse ejerciendo en la cabeza de la probeta un esfuerzo  $F_0$  que se mantiene constante durante la totalidad de éste. En este caso y teniendo en cuenta

el daño de la probeta, el desplazamiento de la cabeza de la misma crece constantemente durante el ensayo.

## **2. A deformación constante**

El ensayo de fatiga, efectuando a deformación constante, es menos disperso que el ensayo hecho a esfuerzo constante. La desviación estándar sobre el logaritmo del número de ciclos para un nivel de sollicitación de  $10^6$  ciclos es de uno para un ensayo realizado a esfuerzo constante (como para gravas tratadas con ligantes).

Los ensayos de fatiga se efectúan generalmente a deformación  $\varepsilon$  constante. La curva de fatiga es lineal en la escala logarítmica.  $\log(\varepsilon)$  es función lineal del logaritmo del número de ciclos.

$$\varepsilon = AN^{-b} \quad \text{Pendiente de la curva} \approx 5 \text{ para asfálticos.}$$

Para niveles de sollicitación idénticos, el ensayo con esfuerzo constante es más severo que el ensayo de deformación constante, es decir que la ruptura de la probeta se produce primero.

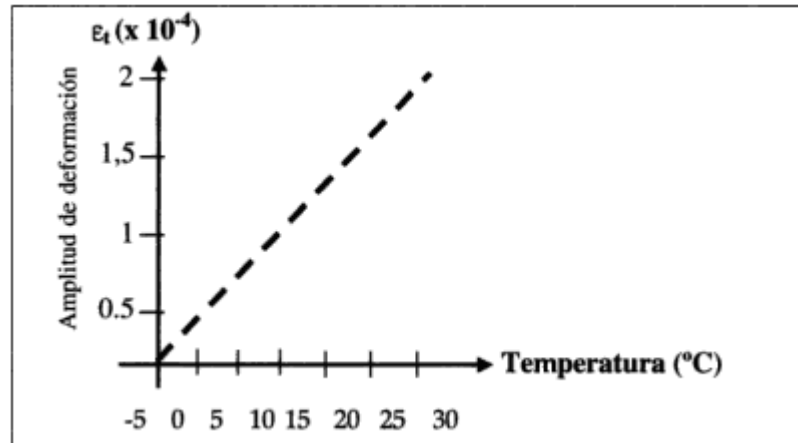
En el segundo caso, la ruptura no se observa realmente al final del ensayo, pero se define una ruptura convencional cuando el desplazamiento en la cabeza de la probeta tiene un valor del doble de lo establecido al comienzo del ensayo.

### **1.2.4.4. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA**

Las propiedades de los materiales bituminosos están muy ligadas a la temperatura.

Los ensayos más corrientes se efectúan a  $10^\circ\text{C}$ , pero pueden hacerse a otras temperaturas. En estos estudios se muestra que la deformación  $\varepsilon_0$ , que conduce a la ruptura a  $N = 10^6$  ciclos, está ligada efectivamente a la temperatura.

La función  $\varepsilon_t(\theta)$  es en general una función creciente, que a partir de  $0^\circ$  se nota que sobre una escala de temperatura  $\varepsilon_t(\theta)\sqrt{E(\theta)}$  permanece constante.



**Figura 12 Deformación admisible a  $N=10^6$  ciclos en función de la temperatura**

#### 1.2.4.5. ENSAYO DE TRACCIÓN DIRECTA

El ensayo de fatiga no es el único de tipo mecánico que se efectúa sobre materiales asfálticos.

Los ensayos convencionales de compresión simple o de compresión diametral (ensayo brasileño) son también útiles, pero a diferencia de lo que se comprueba para materiales tratados con ligantes hidráulicos, estos ensayos no permiten obtener una ley de fatiga para tales materiales.

El ensayo de tracción directa consiste en imponer un desplazamiento  $\varepsilon$  a la probeta que se va a estudiar, asociando al ensayo tres velocidades de deformación y tres temperaturas, lo que permite una estimación de la deformación  $\varepsilon_6$  a  $10^6$  ciclos y a  $10^\circ\text{C}$ .

El valor del módulo a  $30^\circ\text{C}$  permite hacerse una idea de la susceptibilidad del material al ahullamiento. Este ensayo es interesante, ya que gracias a él se puede

obtener rápidamente información sobre el comportamiento en fatiga de materiales extraídos de la calzada, a condición de que su espesor sea superior a 8 cm.

**Tabla 3**  
**Valores del módulo y  $\varepsilon_0$ , dependiendo de la estructura**

10 <sup>6</sup> ciclos		
Concreto bituminoso	E = 6.000 Mpa	$\varepsilon_0 = 160 \times 10^{-6}$
Grava bituminosa	E = 8.000 Mpa	$\varepsilon_0 = 120 \times 10^{-6}$

Fuente: diseño método racional (Fredy A. Reyes Lizcano)

La curva de fatiga tiene una pendiente igual a cinco, es decir, que por 10<sup>N</sup> la deformación a la ruptura está dada por:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_6 \left( \frac{NE}{10^6} \right)^{-0.2}$$

### **1.3. DIMENSIONAMIENTO RACIONAL DE PAVIMENTOS**

#### **1.3.1. INTRODUCCIÓN**

La infraestructura vial incide mucho en la economía de nuestro país por el gran valor que tiene en ésta, pues al alto costo de construcción, mantenimiento o rehabilitación hay que adicionarle también los costos que se derivan por el mal estado de las vías, por eso los nuevos ingenieros que se dediquen a esta rama de la profesión se enfrentarán a un reto muy importante que es el de proporcionar estructuras de pavimentos eficaces con presupuestos cada vez más restringidos.

El método de diseño racional de pavimentos está encaminado a dar una aproximación de las correlaciones empíricas logradas hasta la primera mitad del siglo XX en el diseño estructural de pavimentos; se ha llegado a este estado del arte aplicando metodologías usadas en otras áreas de la ingeniería que tienen en cuenta las propiedades de los materiales que constituyen el pavimento; el procedimiento puede tener el grado de sofisticación que el ingeniero desee. Con este procedimiento se pueden obtener los esfuerzos, deformaciones y deflexiones producidas por las cargas a las que está sometida la estructura (tránsito). El procedimiento seguido para el diseño de un pavimento por métodos racionales se planteó inicialmente por medio de modelos bicapas que posteriormente fueron generalizados a tricapas y multicapa.

#### **1.3.2. APLICACIÓN DE MODELOS**

##### **1.3.2.1. MODELACIÓN EN UN PAVIMENTO FLEXIBLE**

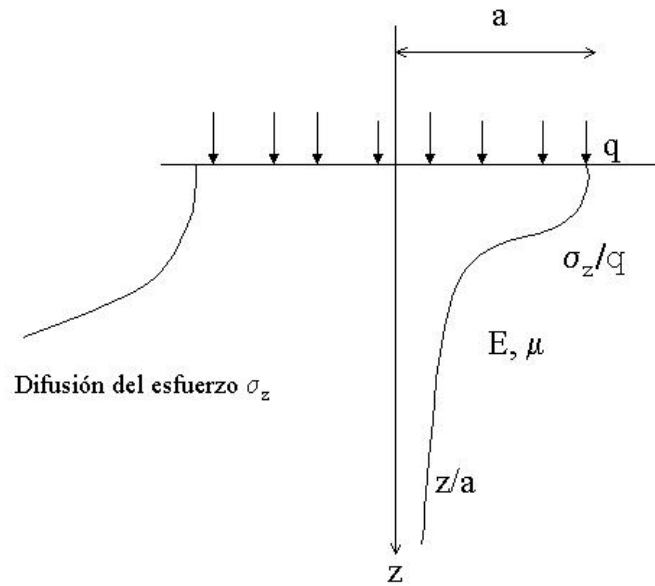
Una buena forma de caracterizar el comportamiento de un pavimento flexible bajo la acción de cargas de ruedas, es considerarlo como un semiespacio homogéneo; éste

tiene un área infinita y una profundidad infinita con una carpeta delgada encima donde son aplicadas las cargas.

Como un primer análisis para determinar la distribución de esfuerzos en un pavimento se aplicó el modelo propuesto por el matemático francés Boussinesq en 1885, estado de esfuerzos en una masa de suelo a cualquier profundidad; el estudio del matemático se basó en una carga concentrada aplicada en un semiespacio lineal, elástico, isótropo y homogéneo; los esfuerzos, deformaciones y deflexiones debidos a la carga concentrada pueden ser extrapolados para obtener aquellas debidas a un área circular cargada.

Esta solución fue por mucho tiempo la única disponible, hasta que en 1945 Donald M. Burmister propuso una teoría que se podía aplicar a estructuras de pavimentos, basada en la de Boussinesq pero que tenía en cuenta estratos y las propiedades mecánicas de los materiales que conforman la masa de suelo, para calcular el estado de esfuerzos de ésta a cualquier profundidad. Desde el punto de vista del estudio de pavimentos, el modelo de Burmister puede ser usado para determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en la subrasante si la relación de módulos del pavimento y la subrasante es cercana a la unidad, si no es así, la modelación es más compleja. Analíticamente es un procedimiento más complejo que los basados en el primer modelo, que se podía solucionar con ecuaciones relativamente fáciles; el modelo de Burmister introduce transformadas de Fourier que requieren funciones de Basel para su solución y que sin la ayuda de un programa de computador no se pueden modelar estructuras de más de dos capas.

La generalización del modelo a estructuras multicapa con diferentes condiciones de frontera fue propuesta por Westergaard, Palmer y Barber, Odemark y otros; estos modelos describen el funcionamiento del sistema en el cual, la presión ejercida por una rueda que puede ser muy alta para ser soportada por el suelo natural; la estructura del pavimento reparte la carga para llevarla lo más reducida posible a la subrasante que es la fundación del pavimento; entonces la solución al problema consiste en determinar a una profundidad  $z$  que cantidad de esfuerzo se ha disipado.



**Figura 13 Modelo de Boussinesq**

La modelación de la solución inicial basada en la teoría de Boussinesq se muestra en la figura 13. La ecuación general para determinar la distribución de esfuerzos es la siguiente:

$$\sigma_z = q_0 \left[ 1 - \frac{\left(\frac{z}{a}\right)^3}{\left(1 + \left(\frac{z^2}{a^2}\right)\right)^{3/2}} \right] \quad (1.3.1)$$

Donde,

$\sigma_z$ : es el esfuerzo vertical a cualquier profundidad.

$q_0$ : es la presión de la carga.

$a$ : es el radio de la carga de huella circular

Se supone un comportamiento lineal entre los esfuerzos y deformaciones, lo que indica que se acepta que los materiales trabajan dentro de su rango elástico; sin

embargo, la reología de los materiales asfálticos demuestra que su comportamiento es viscoelástico, función del estado de esfuerzos, del tiempo de aplicación de las cargas y de la temperatura; de la misma manera los materiales granulares responden a las cargas, de acuerdo al nivel de esfuerzos aplicados, a su densidad y humedad, en general su comportamiento no es lineal y depende en gran medida de las características del material de la capa subyacente; en este sentido existen modelos teóricos elásticos no lineales (Boyce 1980).

#### **1.3.2.1.1. FATIGA EN LOS MATERIALES DEL PAVIMENTO**

En todos los métodos de diseño de pavimentos se acepta que durante la vida útil de la estructura se pueden producir dos tipos de fallas, la funcional y la estructural. La falla funcional se deja ver cuando el pavimento no brinda un paso seguro sobre él, de tal forma que no transporta cómoda y seguramente a los vehículos. La falla estructural está asociada con la pérdida de cohesión de algunas o todas las capas del pavimento de tal forma que éste no puede soportar las cargas a la que está sometido. No necesariamente las dos fallas se producen al tiempo; en este caso se hará referencia a la falla estructural.

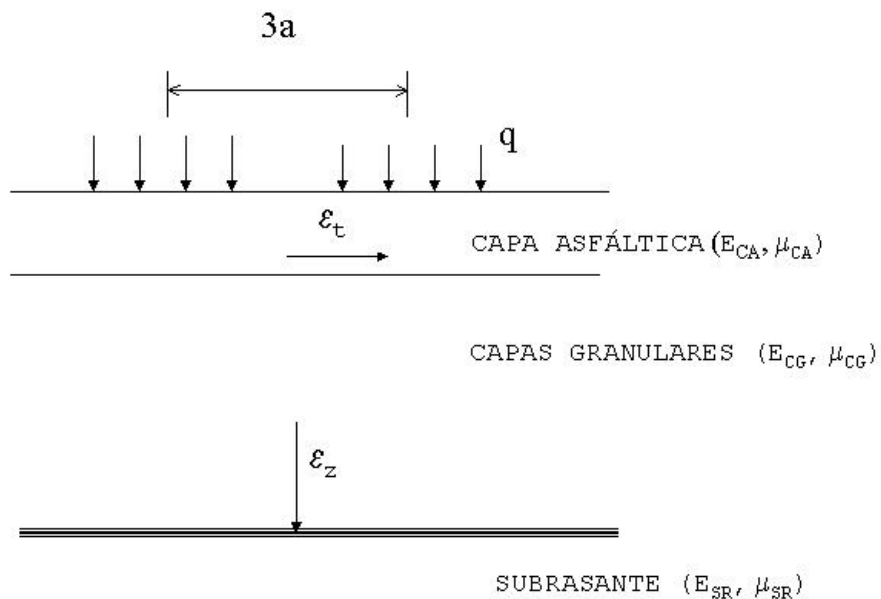
La falla estructural en un pavimento se presenta cuando los materiales que conforman la estructura, al ser sometida a repeticiones de carga por acción del tránsito, sufren un agrietamiento estructural relacionado con la deformación o la tensión horizontal por tracción en la base de cada capa; en este sentido la falla relaciona la deformación o la tensión producida con el número de repeticiones admisibles; esto se denomina falla por fatiga o sea por repeticiones de carga. Estos fenómenos que se producen en el pavimento durante su funcionamiento, pueden ser modelados en el laboratorio haciéndose los llamados ensayos de fatiga; el agrietamiento que se produce en los materiales cuando se hacen las pruebas de laboratorio sobre las muestras de materiales o a escala natural, se asocia con la respuesta resiliente (recuperable) del

pavimento ante las cargas dinámicas; en estos ensayos se ha determinado que las grietas se propagan de la base de cada capa hacia arriba.

Los materiales que forman parte de la estructura se consideran homogéneos e isotrópicos y se supone que las capas tienen una extensión infinita en sentido horizontal.

En esta metodología se considera la estructura de pavimento como un sistema linealmente elástico, en el cual los materiales se encuentran caracterizados por:

- Módulos elásticos( $E$ ).
- Relación de Poisson ( $\mu$  ó  $\nu$ )
- El espesor de la capa ( $h$ ).



**Figura 14 Estructura multicapa de un pavimento flexible**

En la figura 14 se puede observar un modelo multicapa en el que se supone la capa inferior (subrasante) infinita en el sentido vertical, la capa intermedia representa las capas granulares y la capa superior representa los materiales bituminosos. La apropiada caracterización de los materiales constituye un aspecto de gran importancia en el diseño racional de pavimentos; sobre este tema se debe hacer mucha más investigación de la que existe hasta el momento en nuestro medio; las propiedades de los materiales se pueden obtener de varias maneras:

1. Ensayos de laboratorio combinados con ensayos no destructivos.
2. Estimación o uso de nomogramas con correlaciones estadísticas.
3. Comparación con materiales "estándar" de características similares.
4. Medición "in situ" basándose en ensayos no destructivos.

Como se considera que los materiales que conforman la estructura durante su vida útil están trabajando dentro del rango elástico, entonces la fatiga de éstos es causada por repeticiones de carga ( $N$ ) impuestas por el tránsito. Por consiguiente, el comportamiento a la fatiga para las capas que conforman el pavimento se presenta normalmente como una relación entre las repeticiones de carga y la deformación. Entonces el pavimento flexible puede fallar de dos maneras:

- Que la deformación horizontal por tracción  $\epsilon_t$  en la fibra inferior de las capas asfálticas, al flexionar ellas bajo la acción de las cargas, supere cierto límite admisible, en este caso se producirá agrietamiento en dichas capas.
- Que la deformación vertical  $\epsilon_z$  por compresión de la subrasante supere el límite admitido por ella, caso en el cual se presenta una deformación permanente y por consiguiente la del pavimento, en este caso se  $\sigma$  producirá

ahuellamiento. Además se puede verificar que  $z$  se mantenga dentro de los límites admisibles.

En términos generales la ley de fatiga de los materiales que conforman la estructura del pavimento según los resultados de ensayos de laboratorio se puede escribir:

Para la capa asfáltica

$$\varepsilon_t = k N^{-a} \quad (1.3.2)$$

En donde:

$\varepsilon_t$  = Deformación unitaria por tracción en la fibra inferior de la capa de material asfáltico.

$N$  = Número admisible de repeticiones de carga.

$a, k$  = Parámetros que dependen del tipo de material de la capa, determinados experimentalmente.

Para la Subrasante

$$\varepsilon_z = k N^{-b} \quad (1.3.3)$$

En donde:

$\varepsilon_z$  = Deformación unitaria vertical en la capa superior de la subrasante.

$N$  = Número admisible de repeticiones de carga.

$b, k$  = Parámetros que dependen del tipo de material de la capa, determinados experimentalmente.

Cuando algunas de las capas de los materiales granulares que forman parte de la estructura de pavimento esta tratada con cemento Portland, la ecuación de la ley de la fatiga que hay que verificar es la relacionada con la tensión horizontal de tracción como sollicitación crítica, ésta según los franceses (LCPC) es:

$$\sigma_{adm} = a (N/10^6)^{-1/2} \sigma_0 \quad (1.3.4)$$

En donde:

$\sigma_{adm}$  = Tensión admisible por tracción en la fibra inferior de la capa de material.

N = Número admisible de repeticiones de carga.

a = Parámetros que dependen del tipo de material.

$\sigma_0$  = Resistencia a la flexotracción del material.

### 1.3.3. MODELACION DE UN PAVIMENTO RÍGIDO O HIDRÁULICO

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 modelos de la mecánica de calzadas que se utilizan para el dimensionamiento de las calzadas en concreto son: el modelo de Westergaard y el modelo de Burmister.

### El Modelo de Westergaard (1926)

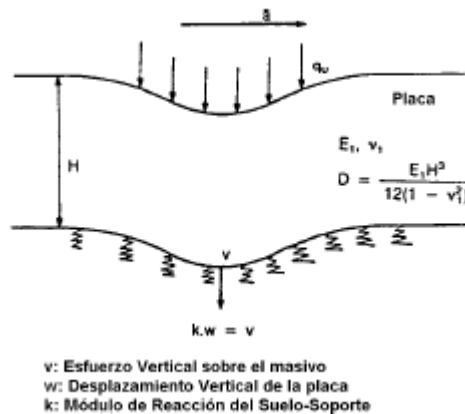
Anterior al modelo de Hogg, sigue la lógica del modelo de Boussinesq, el modelo de Westergaard conduce a una aproximación diferente. La complejidad relativa del modelo de Hogg, proviene en efecto de la naturaleza misma del masivo de Boussinesq, que soporta la calzada.

Partiendo del principio que la hipótesis de un masivo de Boussinesq para el soporte de la calzada no es si no una hipótesis simplificada (el comportamiento del suelo es infinitamente más complejo); Westergaard ha adoptado para el suelo otra hipótesis significativa que facilita los cálculos.

La hipótesis de placa delgada para la calzada, del modelo de Westergaard lleva a cabo la esquematización del suelo así:

Éste se asimila a un sistema de resortes cuyo desplazamiento vertical en un punto ( $w$ ), es proporcional a la presión vertical ( $v$ ) en ese punto, o sea  $v = Kw$ .

El modelo de cálculo adoptado se esquematiza en la figura 15, este modelo es todavía muy utilizado. En efecto, las hipótesis simplificativas que comporta permiten tratar problemas que otros modelos (Hogg y Burmister) no pueden resolver y, en particular, los problemas de carga en el borde o esquina de la placa en concreto.



**Figura 15 Esquema del modelo de Westergaard**

En el modelo aparece una variable fundamental del comportamiento de los materiales tratados con ligantes hidráulicos, el radio de rigidez de la placa:

$$l = \sqrt[4]{\frac{(E1x > H^3)}{(12x(1 - \mu^2))xK}} \quad (1.3.5)$$

P es la carga aplicada y a es el radio de carga del esfuerzo de tracción en la base de la calzada:

$$\sigma_T = \frac{P}{H^2} x C x \left(\frac{1}{a}\right) \quad (1.3.6)$$

Donde C, es una función creciente del, que depende de la posición de la carga. Para una carga circular en el centro de una placa, por ejemplo, este resultado se aproxima al que da el modelo de Hogg:

$$\sigma_T = \frac{P}{H^2} x \frac{(1 + \nu)}{2} x F \left( \frac{E1}{E2} x \frac{H^3}{a^3} \right) \quad (1.3.7)$$

En los dos casos, la influencia del espesor se representa por  $H^3$  y el soporte por  $E_1/K$  ó  $E_1/E_2$ , según el modelo. La influencia de una variación del modelo del suelo soporte o de la calzada es bajo comparativamente al de la variación del espesor de la calzada.

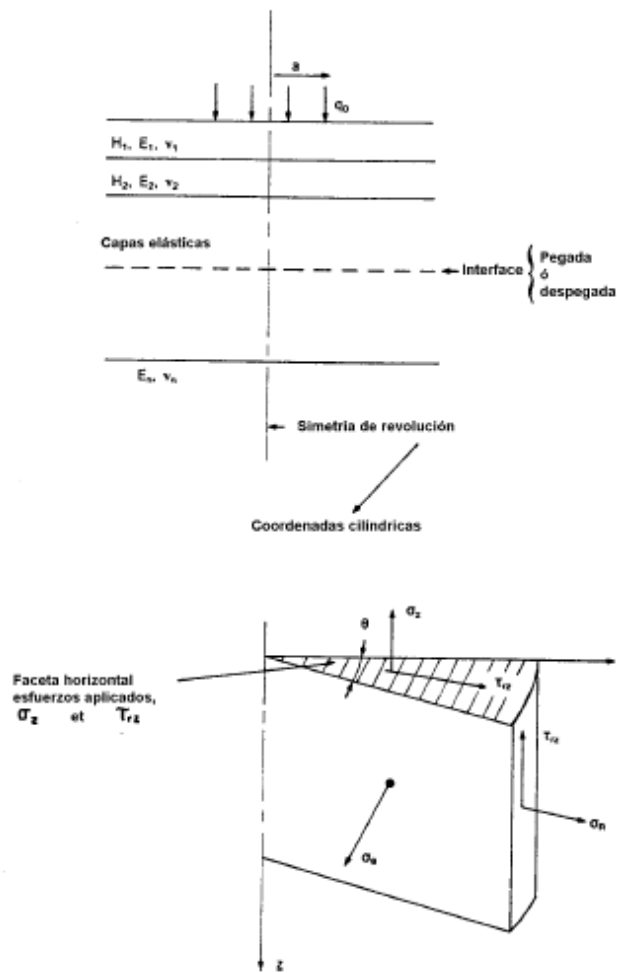
### **Los Modelos Multicapas (Burmister, 1943)**

El modelo bicapa permite determinar las grandes tendencias de variación (rol del espesor, rol de la relación de módulos entre capas, influencia del radio de carga) pero se limita a un bicapa; lo que hace necesario pasar a modelos de n capas, ya que éstos facilitan enormemente la esquematización de las estructuras: Una estructura tradicional, se representa mejor por un esquema tricapa (suelo, cuerpo granular y capa de rodadura).

En los estudios de refuerzo, los esquemas de estructuras que hacen intervenir un número de capas más importante son deseables (por ejemplo tres capas para la antigua calzada y dos adicionales para el refuerzo). Burmister, trata el problema general de n capas tal como se esquematiza en la figura 16

Se trata de un modelo muy poderoso ya que:

- Todas las capas se tratan como sólidos elásticos (la hipótesis de placa se evita).
- Las interfases entre placas pueden ser pegadas o despegadas y una misma estructura puede tener tanto capas pegadas como despegadas.
- En el caso de cargas múltiples (ejes simples, tandem o triden), pueden tratar adicionando los efectos de capas elementales.



**Figura 16 Esquema del modelo de Burmister**

### 1.3.3.1. APLICACIÓN DE MODELOS EN MATERIALES HIDRAULICOS

Los fenómenos de fraguado afectan las calzadas en concreto de cemento y originan discontinuidades: las fisuras para el concreto armado en continuo y juntas transversales para las estructuras no armadas.

En una placa de concreto, los esfuerzos debidos al tráfico son más importantes cuando las cargas se disponen cerca a las juntas transversales, en una esquina o en el borde que cuando ellas están en medio de la placa.

Los gradientes térmicos provocan deformaciones en la placa, sumadas a las que provoca su propio peso.

Estas solicitaciones cíclicas son de muy baja frecuencia en comparación con el tráfico; ellas dependen de un efecto de modificación o mayoración de los esfuerzos debidos a las cargas rodantes.

Los esfuerzos bajo carga en el medio de la placa son calculados asimilando la calzada en concreto a una estructura continua. Las discontinuidades y los efectos de gradientes térmicos son tomadas en cuenta mayorando los esfuerzos precedentes por un coeficiente que depende de la calidad de la transferencia de cargas entre las placas durante la duración del servicio de la calzada. Este coeficiente ha sido determinado en función de la frecuencia de los gradientes térmicos y de la acumulación de los esfuerzos debidos al tráfico.

El cálculo se efectúa sobre un multicapa elástico con las condiciones siguientes:

- La interfase de la capa de sub-rasante se considera pegada.
- Para el concreto previbrado la capa de base no está pegada con la del soporte.

Las disposiciones que se toman en cuenta en la puesta en obra para desolidarizar la capa de base de su soporte (interposición de una emulsión, o de una hoja de polietileno, o una doble capa de curado cuando la fundación es en concreto pobre) a

fin de limitar la fisuración de fraguado no controlado y prevenir la remontada de las fisuras en las edades jóvenes.

La eventual capa de rodadura es un material bituminoso y se encuentra pegado a su soporte.

### 1.3.3.2. CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO

#### ➤ Las estructuras con capa de fundación

Las estructuras en concreto con capa de fundación se calculan en función de la ruptura por fatiga de la capa de base y de la capa de fundación, verificando que los esfuerzos de tracción en estas capas sean inferiores a los valores admisibles.

Las deformaciones verticales en la superficie de la plataforma soporte son suficientemente pequeñas para que no sea necesario determinarlas en el diseño.

#### ➤ Estructuras en concreto de armado en continuo

Cuando la capa de sub-rasante que se trata es de muy buena calidad, la capa de fundación no es necesaria para una estructura en concreto armado en continuo. La capa de forma se toma en cuenta para el cálculo de la estructura por un estudio global de la capa de forma/calzada. Para evitar la erodabilidad del soporte se debe colocar como mínimo una capa de 5 cm de espesor sobre la capa de la sub-rasante.

#### ➤ Determinación del esfuerzo de tracción admisible $\sigma_{t.ad}$ en la capa de base en concreto

El valor de  $\sigma_{t.ad}$  está dado por la relación:

$$\sigma_{t.ad} = \sigma_t (N.E) k_r k_d k_c \quad (1.3.8)$$

$\sigma_t (N.E)$ : 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.

$$\sigma_t(N.E) = \sigma_6(N.E/10^6)^b \quad (1.3.9)$$

- $k_r$  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  $Sh$ ) y sobre los resultados de los ensayos de fatiga. (desviación estándar  $SN$ ).

$$k_r = 10^{-ub\delta} \quad (1.3.10)$$

$u$ : Variable centrada reducida asociada al riesgo  $r$

$b$ : pendiente de la ley de fatiga del material (ley bi-logarítmica)

$\delta$ : desviación estándar de la distribución del Log  $N$  a la ruptura.

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh]^{0.5} \quad (1.3.11)$$

$c$ : coeficiente que relaciona la variación de los esfuerzos con la variación aleatoria del espesor de la calzada

$\Delta h$ , ( $\log = \log \sigma_0 - C\Delta h$ ): Para las estructuras corrientes, el valor de  $c$  es de  $0.02\text{cm}^{-1}$ .

- $k_d$  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  $k_d$  son los siguientes:

**Tabla 4 Coeficiente  $k_d$  para las calzadas en concreto**

	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 (Fredy A. Reyes Lizcano)

- $k_c$  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.
- Determinación del esfuerzo de tracción admisible  $\sigma_{t,ad}$  en la capa de fundación en un concreto pobre o con materiales tratados con ligantes hidráulicos.

El valor de  $\sigma_{t,ad}$  está dado por la relación:

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_t (NE) k_r k_c k_s \quad (1.3.12)$$

Donde:  $\sigma_t (NE)$ ,  $k_r$ ,  $k_c$ ,  $k_s$  tienen las mismas definiciones que para las calzadas tratadas con ligantes hidráulicos.

- Valores de riesgo para las calzadas en concreto

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 de base y en la capa de fundación son independientes.

- El comportamiento de la capa de base no está influenciado por la degradación de la capa de fundación sino después de un cierto tiempo.

Por lo tanto:

- Para las estructuras sin dispositivo de transferencia de carga entre las placas, si  $r_1$  es el riesgo de cálculo retenido para la capa de base, el riesgo de cálculo retenido para la capa de fundación se toma igual a  $r_2 = 2r_1$ ,

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

### ➤ Dimensionamiento del acero

Los aceros se aplican en todas las técnicas de construcción de placas o concreto armado continuo. Los aceros de transferencia se colocan en el sitio en las juntas a fin de tener la junta cerrada; la transferencia de carga se asegura por el confinamiento de los perfiles laterales con las bandas o bermas adyacentes. Su utilización es necesaria para las juntas de las placas de concreto que soporten un tráfico superior o igual a T1. Los hierros se colocan perpendicularmente al plano formado por la junta y en la mitad del espesor de la placa.

Su longitud es al menos igual a 0.60 m.

La sección de hierros por metro de longitud está dada por la fórmula:

$$S = (f l P) / L_s \quad (1.3.13)$$

Con:

f: Coeficiente de fricción del concreto sobre el suelo de soporte, generalmente se toma igual a 1.5

l: Longitud que separa a la junta con el borde libre más próximo.

P: Peso del revestimiento por metro cuadrado.

$L_s$ : Esfuerzo admisible en el acero, se toma igual al 75 % del límite elástico.

El diámetro del hierro se escoge a partir de la sección S, a fin de que su separación esté comprendida entre 0.70 y 1 m.

### ➤ Los Pasadores para las Calzadas de Placas

Los separadores deben ser hierros redondos lisos, que permitirán transferencia de carga entre dos placas, ellos se localizarán paralelamente al eje de la calzada y se colocarán en la mitad de la placa.

➤ **Características de los Pasadores**

**Tabla 5 Características de los Pasadores**

Espesor de la placa	Diámetro de pasadores	Longitud de pasadores	Separación de pasadores
13 a 15	2	40	30
16 a 20	2.5	45	30
21 a 28	3	45	30
29 a 40	4	50	40
41 a 50	4.5	55	45

Fuente: diseño racional de pavimentos (Fredy A. Reyes Lizcano)

➤ **Las armaduras longitudinales de concreto armado continuo**

Las armaduras longitudinales se colocan en el sitio en las estructuras armadas continuas a fin de:

- Repartir los esfuerzos de fraguado del concreto.
- Prevenir la apertura de las fisuras.

Estas armaduras se colocan en un plano paralelo a la superficie de la calzada:

- Bajo la fibra neutra (a la mitad del espesor de la placa), en la zona que se comprime bajo las cargas rodantes.
- A más de 8 cm de la superficie de la calzada para evitar la corrosión.

La relación  $p$  de las secciones de acero y del concreto es función de la adherencia entre los dos materiales, del grado del acero y de la resistencia a la tracción del concreto. La relación  $p$  será igual a:

$$p = 0.67 (f_t / 3.3) \quad (1.3.14)$$

$f_t$  es la resistencia media en tracción por flexión del concreto a 28 días (ó 56 días si el concreto es de fraguado lento).

El diámetro de las varillas debe estar entre 12 y 16 mm.

- **Características de los materiales** es necesario conocer las características de cada material de concreto de cemento o hidráulico por lo que se presenta la siguiente tabla:

**Tabla 6 Características de los materiales**

	<b>E(MPa)</b>	$\sigma_6$ (MPa)	<b>b</b>	<b>SN</b>
<b>Concreto</b>	<b>35.000</b>	<b>2,15</b>	<b>-1/16</b>	<b>1</b>
<b>Concreto pobre</b>	<b>24.000</b>	<b>1,63</b>	<b>-1/15</b>	<b>1</b>

Fuente: diseño método racional (Fredy A. Reyes Lizcano)

Coefficiente de poisson  $\nu = 0.25$

#### **1.3.4. DISEÑO AVANZADO POR MÉTODOS RACIONALES**

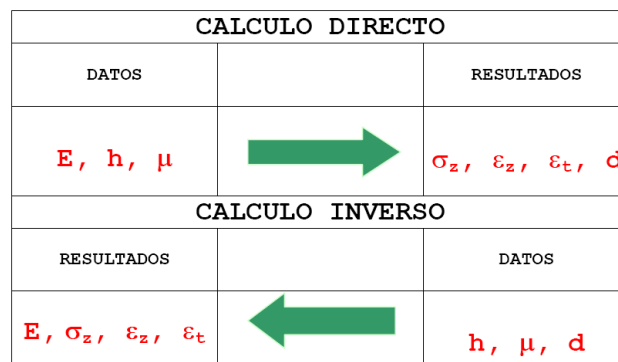
El procedimiento de diseño por la metodología racional consiste en escoger una adecuada combinación de espesores de capas y características de materiales (E,  $\mu$ , h) para que los esfuerzos y deformaciones ( $\sigma_z$ ,  $\epsilon_z$  y  $\epsilon_\tau$ ) causados por las solicitaciones a que se somete la estructura, permanezcan dentro de los límites admisibles durante la vida útil de la estructura que están constituyendo.

En términos generales, con las leyes de fatiga de los materiales se puede encontrar las deformaciones, esfuerzos y deflexiones admisibles de los materiales y con la teoría de esfuerzo y deformación en una masa de suelo se encuentran las deformaciones, esfuerzos y deflexiones actuantes en la estructura de pavimento.

Teniendo en cuenta la gran capacidad de las herramientas computacionales actuales y con una adecuada caracterización de los materiales, se pueden programar las ecuaciones diferenciales para calcular los esfuerzos, deformaciones y deflexiones a

las que está sometido el pavimento y la subrasante por acción de las cargas impuestas por el tránsito; en nuestro medio se tiene fácil acceso a programas como el DEPAV del paquete INPACO del Instituto de Vías de la Universidad del Cauca, también existen otros programas como ALIZE III, BISAR, CHEVRON, ELSYM 5, KENLAYER, EVERSTRESS, KENPAV (Modelo elástico no lineal), etc., que realiza estos cálculos; obtenidos los esfuerzos, deformaciones y deflexiones pueden ser comparados con los límites admisibles obtenidos por medio de las leyes de la fatiga de los materiales.

Cuando hay que estimar la capacidad estructural de un pavimento en servicio que está llegando al final de su período de diseño se recurre a medir el desplazamiento vertical del pavimento (deflexión) bajo una carga estándar predeterminada; esta estimación se hace conociendo los espesores y las deflexiones en uno o en varios puntos donde se aplica dicha carga; con estas deflexiones y espesores se pueden determinar los valores de los módulos de los materiales que están constituyendo el pavimento; esto se conoce con el nombre de cálculo inverso 4 en el que la solución no es exacta ni única y se requieren de varias reiteraciones y del criterio de ingeniero para ajustar la solución definitiva; para el cálculo inverso también existen programas de computador como el EVERCAL 5.0, MODULUS 5.1, que hacen las iteraciones necesarias automáticamente y no manualmente como se ha hecho hasta la actualidad en nuestro medio. En el siguiente esquema se muestra el proceso del cálculo directo e inverso.



### **1.3.5. VALORACIÓN DE LOS MODELOS**

Podemos decir que este capítulo, es muy importante, ya que nos proporciona una variedad de modelos (fórmulas) de cálculo, con el fin de aproximarse rápidamente al dimensionamiento de las capas de los pavimentos.

La validez de estas fórmulas se fundamenta en el respeto sobre su dominio de utilización, aun si parece muy restrictivo, y en los valores de los parámetros de entrada, los cuales deben provenir forzosamente de la medición en laboratorio del módulo elástico y la ley de fatiga de los materiales.

## CAPÍTULO III

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1. CONCLUSIONES

La infraestructura vial incide mucho en la economía de nuestro país por el gran valor que tiene en ésta, pues al alto costo de construcción, mantenimiento o rehabilitación hay que adicionarle también los costos que se derivan por el mal estado de las vías, por eso los nuevos ingenieros que se dediquen a esta rama de la profesión se enfrentarán a un reto muy importante que es el de proporcionar estructuras de pavimentos eficaces con presupuestos cada vez más restringidos.

El conocimiento de nuevos métodos de diseño de pavimentos, que consideren características de los materiales de las distintas capas del pavimento y los espesores, de tal forma que el pavimento mantenga un “índice” de servicio aceptable durante la vida de servicio estimada, por lo que el método racional a través del programa computacional kenpav proporciona estas consideraciones, por lo que es importante el manejo de dicho programa.

Es importante la aplicación del análisis deformacional de cada tipo de rodadura antes del diseño, ya que nos indica:

- a) Mejorar las condiciones de soporte del suelo de fundación
- b) Incorporar capas estabilizadas en tráfico pesado y/o cimentaciones de baja capacidad
- c) Recuperar la función de cada capa de rodadura
- d) Controlar las deflexiones de las capas durante la construcción del pavimento

El conocimiento de que las llantas en un pavimento no sólo generan esfuerzos verticales sino también esfuerzos horizontales, los cuales se disipan a través de la

capa de rodadura pasando de un valor positivo en la superficie a uno negativo en su fibra inferior.

El aporte del análisis deformacional en el diseño de pavimentos, cualquiera sea su categoría es de suma importancia debido a que permite evaluar el criterio de diseño aplicado, el tipo de diseño considerado y la influencia de las condiciones de cimentación.

En conclusión, incrementar el espesor de las capas de rodadura no reduce en gran magnitud las deformaciones por tracción, la mejor alternativa es minimizar las deformaciones plásticas en las capas granulares y a nivel de la fundación mediante la estabilización. Porque es contraproducente convertir de capas de rodadura a equivalentes de espesores de base granular, porque las capas de rodadura como se pudo evidenciar en este trabajo tienen un módulo elástico por lo menos 15 veces mayor al de la base granular, por lo que el costo del pavimento sería mucho mayor, por todo esto consideramos muy importante el análisis deformacional antes del diseño de cada pavimento para poder definir todos los espesores adecuados de la estructura del pavimento y no sobredimensionar ninguna de sus capas.

En el caso de pavimentos rígidos se concluye con esta metodología que a partir de la deformación admisible provocada por el tráfico pesado, es que podemos dimensionar las capas del pavimento; además que se observan una serie de combinaciones de espesores que cumplen con los valores admisibles de diseño para las condiciones y características de cada diseño en particular, pudiendo ajustar el que diseña a un análisis técnico y económico, ya que cuenta con la información necesaria. Así también se concluye que a través de este método resulta fácil generar tablas con valores de deformación admisible de acuerdo a una clasificación del tráfico por el número de vehículos pesados y parámetros asumidos para el cálculo.

Se concluye que en general tanto para pavimentos rígidos como flexibles a menor calidad de un material, se requiere mayores espesores de las capas que la componen.

Finalmente haciendo una comparación entre los resultados obtenidos de las deformaciones se concluye que en el caso de pavimentos flexibles se producen grandes deformaciones, mientras que en el pavimento rígido estas deformaciones son pequeñas.

### **3.2. RECOMENDACIONES**

Las recomendaciones más relevantes para prevenir las deformaciones y mejorar el desempeño y las prestaciones de mezclas asfálticas colocadas como la capa de rodadura en los pavimentos sometidos a condiciones severas de servicio, y que dichas deformaciones contribuyen a la ruptura y agrietamiento de la carpeta asfáltica, ocasionando así que el pavimento aumente el costo operativo.

Se recomienda que el agregado grueso con el cual se pretende elaborar la mezcla asfáltica, presente suficientes caras de fractura para un mayor rozamiento interno entre las partículas y cumpla con los requisitos de resistencia a la abrasión para evitar que la granulometría inicial cambie cuando la mezcla soporte las cargas del tráfico.

Una capa de rodadura construida con una mezcla asfáltica que contiene un asfalto de alta penetración y baja viscosidad, es muy susceptible a la formación de roderas.

Hay que cuidar durante la elaboración de las mezclas asfálticas, que tanto la granulometría como el ligante con los cuales se diseñó la mezcla, verdaderamente se cumplan a la hora de realizar la fabricación de la mezcla en la central. Es de gran importancia también verificar la temperatura de mezclado y compactación de la mezcla a la hora de la puesta en obra.

Una compactación eficiente de la mezcla asfáltica, con el equipo de construcción adecuado, y a una temperatura dentro del rango aceptable de compactación, ayuda a prevenir de manera muy notoria la formación de roderas.

Evitar la segregación de la mezcla asfáltica durante el transporte y el extendido de la mezcla puede ser un factor favorable en la ganancia de estabilidad de la mezcla y la no deformabilidad de la misma.

La capa de rodadura puede mostrar incidencias como consecuencia de fallos en capas inferiores tales como: falta de capacidad portante local o generalizada, mal drenaje, zonas locales segregadas o con materiales degradados, agrietamientos o juntas que se han reflejado en la superficie, entre otros.

En los pavimentos rígidos se recomienda controlar una dosificación correcta, y vibración a tiempo de la construcción, ya que esto evitará el deterioro del pavimento.

Para calcular las deformaciones a través de programas computacionales, se recomienda el programa de cálculo empleado para modelar la estructura, KENLAYER, (kenpav), presenta ventajas sobre otros programas de la misma categoría como el DEPAV, ELSYM5, entre otros, debido a que permite calcular un número mayor de capas y nos sirve para pavimentos flexibles y rígidos.

## CAPÍTULO II

### ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TIPOS DE RODADURA EN LA DEFORMACIÓN DE LOS PAVIMENTOS

#### 2.1. PARÁMETROS DE LOS ANÁLISIS

Los parámetros a considerar en el análisis de deformación de los pavimentos en la capa de rodadura, serán:

- **El tránsito**
- **Periodo de Diseño:** Trata de los parámetros de cálculo cuya escogencia de valores se basan en el análisis de la función económica de la calzada del pavimento.
- **Los datos climáticos y del ambiente:** Esto agrupa los datos descriptivos de las condiciones climáticas del sitio del proyecto que tienen una influencia directa sobre la selección de las variables de cálculo.
- **Los Parámetros descriptivos de los materiales:** Este conjunto corresponde a las propiedades de los materiales de calzada y del soporte que son necesarias en el cálculo de estructura de la calzada, en base a los módulos dinámicos, coeficiente de Poisson y leyes de fatiga.

##### 2.1.1. TRÁNSITO

En el capítulo I, mencionamos la importancia que tiene el estudio de tráfico para el diseño de una carretera, porque el tránsito vehicular constituye la solicitud directa al sistema estructural que constituye el pavimento; es bajo el paso repetido de los vehículos que los pavimentos se deterioran. Su caracterización es fundamental, y a la

vez muy compleja dada la gran distribución de tipos de vehículos y, por tanto, de cargas que se pueden encontrar en la actualidad.

Pero sabemos que el método racional de pavimentos, sólo considera el conocimiento de los vehículos pesados, por lo cual también en nuestro análisis consideramos sólo vehículos pesados que intervienen en:

- El criterio de selección de las calidades de ciertos constituyentes que se emplean en la fabricación de los materiales de la calzada, como por ejemplo la dureza de los granulares.
- Como parámetro de entrada para el análisis mecánico del comportamiento a la fatiga de la estructura de calzada.
- Son definidos como pesos pesados los vehículos cuya carga útil es superior o igual a o mayor a 5 Toneladas (50 KN)

Para el cálculo del dimensionamiento, este tránsito acumulado sobre la duración inicial de vida se tomará en cuenta en consideración a través de la noción del tránsito equivalente.

La clase de tránsito está determinada a partir del tránsito de los vehículos pesados por sentido teniendo en cuenta el promedio anual diario para la vía más cargada en el año de puesta en servicio.

Para el cálculo del dimensionamiento de la calzada el tránsito se caracteriza por el número equivalente de ejes de referencia correspondiente al tránsito de vehículos pesados acumulados en la duración inicial del cálculo retenido (vida útil).

El eje de referencia es un eje simple con ruedas gemelas cuya carga es de 130 kilo - newton. El número de ejes equivalente es función de los valores de los conteos del tránsito en el año de puesta en servicio de éste, de la tasa de crecimiento durante el período de diseño (vida útil), de la composición del tránsito y de la naturaleza de la estructura de la calzada. Se calcula teniendo en cuenta la siguiente relación:

$$NE = N \times CAM \text{ (factor camión)} \quad (2.1)$$

NE: Número de ejes equivalentes

N: número acumulado de pesos pesados para el período de cálculo de P años

CAM: agresividad media de los vehículos pesados con relación al eje de referencia.

Cálculo del número total N de pesos Pesados.

$$N = 365 \times MJA \times C \quad (2.2)$$

C: factor acumulado en el período de cálculo

MJA: tránsito pesado promedio anual diario.

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

$$C = \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] \quad (2.3)$$

La configuración de ejes (tandem, tridem) con ruedas (simples o gemelas) y su carga son variables de un peso pesado con respecto a otro. Para una carga dada los esfuerzos y las deformaciones en la calzada a un cierto nivel son función de la estructura de la misma, del comportamiento en la fatiga y de los daños que pueda provocar la aplicación de una carga dada, la cual depende de la naturaleza propia de los materiales. Un peso pesado no tendrá la misma agresividad si circula sobre una calzada bituminosa flexible o sobre una calzada que está compuesta y tratada por capas con ligantes hidráulicos.

### **Valor del coeficiente de agresividad media CAM**

Se calcula en función del tránsito a partir del número acumulado de vehículos:

**Tabla 7****Clasificación del tránsito a partir del número acumulado de vehículos pesados**

Clasificación de Tránsito	Numero acumulado de vehículos pesados
T <sub>1</sub>	Menor de 500.000
T <sub>2</sub>	Entre 500.000 y 1.500.000
T <sub>3</sub>	Entre 1.500.000 y 4.000.000
T <sub>4</sub>	Entre 4.000.000 y 10.000.000
T <sub>5</sub>	Entre 10.000.000 y 20.000.000

Fuente: diseño método racional (Fredy A. Reyes Lizcano)

**Tabla 8****Determinación del coeficiente de agresividad media para todos los materiales y tránsito bajo**

Tipo de Tránsito	T <sub>0</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
Coeficiente de agresividad media (CAM)	0,4	0,5	0,7	0,8

Fuente: diseño método racional (Fredy A. Reyes Lizcano)

**2.1.2. PERIODO DE DISEÑO**

En todo dimensionamiento de una estructura de calzada se debe tener en cuenta los términos probabilísticos en una primera etapa del cálculo, se debe tomar un valor de probabilidad de ruptura de la calzada en los N años de diseño; si se tiene en cuenta los conteos del tránsito esta duración inicial variará según el riesgo de los daños que se

tomen, un menor daño equivale a incrementos económicos en la construcción de esta vía.

### **2.1.3. LOS DATOS CLIMÁTICOS Y DEL AMBIENTE**

Los factores climáticos tienen su importancia, ya que las propiedades de los materiales, dependen fuertemente de los valores de temperatura y humedad presentes en la sección estructural del pavimento. Por ello es necesario conocer fundamentalmente la distribución en el medio físico.

Los ciclos estacionarios y los valores extremos de la temperatura, particularmente en las calzadas tratadas con ligantes hidráulicos en donde la durabilidad y la deformabilidad dependen de la temperatura, de la resistencia del suelo soporte y del estado hídrico de la sub-rasante.

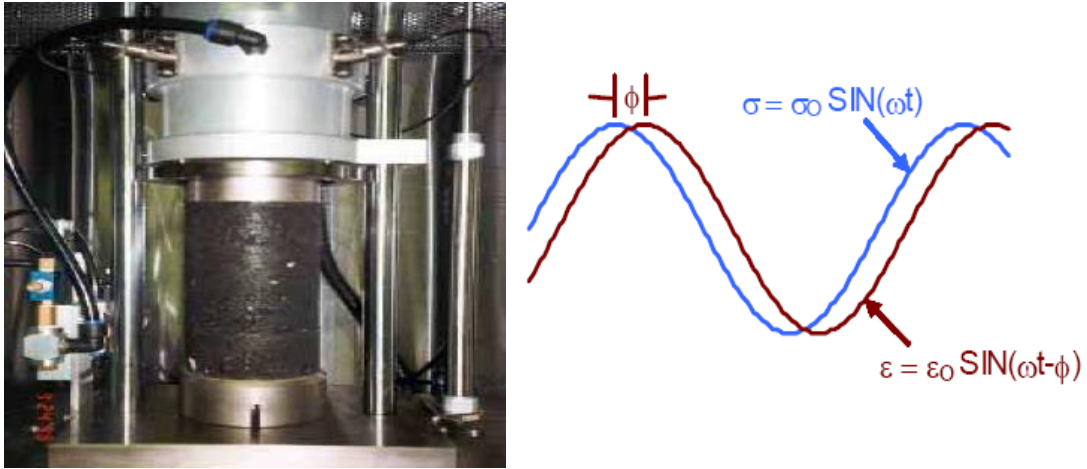
### **2.1.4. PARÁMETROS DESCRIPTIVOS DE LOS MATERIALES**

De una manera sencilla se puede decir que las propiedades fundamentales de los materiales que usualmente son parte de la sección estructural de un pavimento, se deben determinar a partir de ensayos de laboratorio de carga repetida.

Para el caso de las mezclas asfálticas, la propiedad se llama módulo dinámico, determinado según la norma ASTM D3497, en donde un espécimen cilíndrico se somete a pulsos repetidos de cierto esfuerzo cíclico, en condiciones de compresión no confinada. El módulo dinámico se calcula como el cociente entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria elástica en cada ciclo de carga.

El ensayo se deberá realizar para el rango de temperaturas esperado en el lugar, la velocidad de operación esperada, y para el diseño volumétrico de la mezcla seleccionada.

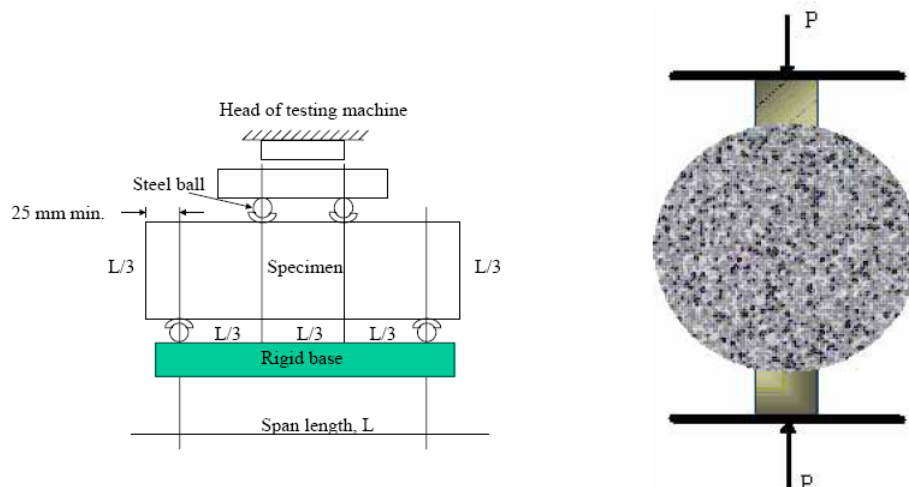
**Figura 17**  
**Montaje de un ensayo de módulo dinámico en mezclas asfálticas**



Para el caso del concreto hidráulico y materiales estabilizados, se requiere el valor del módulo de elasticidad tal y como se obtiene convencionalmente con la norma ASTM C469, y una estimación del valor de la resistencia a la tensión, ya sea obtenido a flexión (ASTM C78) ó en tensión indirecta (ASTM C496), a fin de determinar el módulo de ruptura de esa clase de materiales.

Para el concreto, también se requiere el valor del coeficiente de expansión térmica.

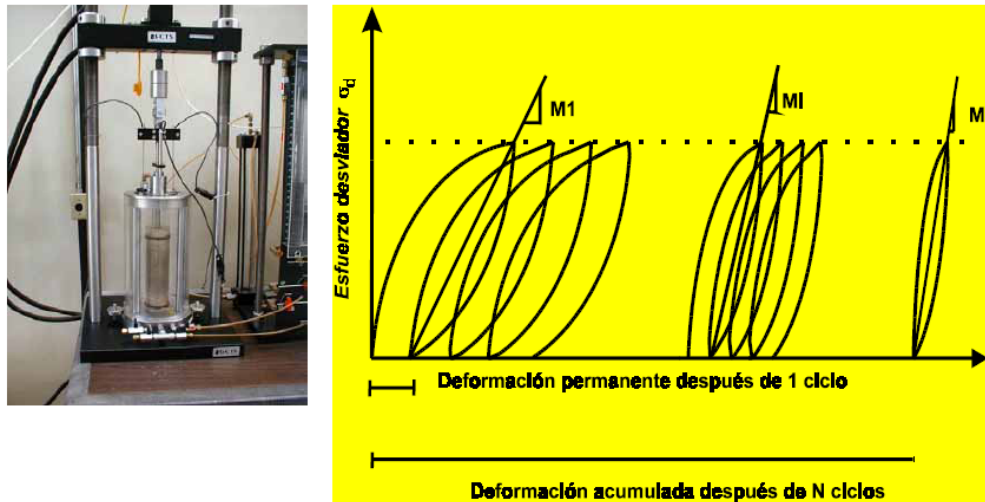
**Figura 18**  
**Esquema de los montajes en flexión y tensión indirecta para la determinación de la resistencia a la tensión de concretos hidráulicos y materiales estabilizados**



Para suelos y materiales granulares, la propiedad de referencia es el módulo de resiliencia, que se ejecuta de acuerdo con la norma AASHTO T274, y cuyo montaje se muestra en la figura. En este caso, la prueba se ejecuta por medio de un ensaye triaxial donde la presión de confinamiento es constante, y el esfuerzo desviador se aplica cíclicamente. El módulo de resiliencia se define como el cociente entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación unitaria elástica en cada ciclo de carga. Los ensayos de módulo de resiliencia se deben realizar en condiciones representativas de la colocación de los materiales en obra, como son las características de peso volumétrico, contenido de agua de compactación, método de compactación, granulometría, etc, ya que el ensaye es muy sensible a esas condiciones.

**Figura 19**

**Ilustración de una cámara triaxial y el concepto de módulo de resiliencia**



En todos los materiales se necesitarán los valores correspondientes a la relación de Poisson.

Basados en un estudio específico, los módulos mencionados se podrán estimar a partir de la medición de otros parámetros más comunes, como puede ser la resistencia

a la compresión simple, o el valor relativo de soporte. Sin embargo, siempre será una mejor práctica la ejecución directa de los ensayos.

#### **2.1.4.1. SUELO SOPORTE O SUBRASANTE**

En el cuerpo de la calzada bajo el eje de referencia para realizar los cálculos de las solicitaciones, el suelo soporte es generalmente asimilado a un medio elástico definido por: el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, estos parámetros mecánicos definen el comportamiento a largo tiempo para la parte superior de la subrasante; para el coeficiente de Poisson se tomará un valor medio de 0.35 sabiendo que este parámetro varía con la naturaleza de los suelos, su estado hídrico y las solicitaciones aplicadas.

El terreno de fundación en nuestro medio puede tener las siguientes características:

**Pésimo.-** Un terreno de fundación pésimo debe desecharse o en su caso debe realizarse un mejoramiento de las subrasante.

**Malo.-** Se halla formado por limos, arcillas se debe colocar sub-base, base y capa de rodadura.

**Regular a bueno.-** Están formado por suelos bien graduados posiblemente no requerirá sub-base.

**Excelente.-** Tiene un valor soporte bien elevado no requiere de sub-base o en su caso sólo capa de rodadura.

#### **2.1.4.2. APROXIMACIÓN DEL MÓDULO A PARTIR DEL CBR**

Por facilidad, siempre se ha querido obtener a partir de un valor de módulo que sea directamente utilizable para el cálculo de espesores mediante el método racional.

Entre las correlaciones que se han propuesto, se pueden citar:

- La fórmula  $E = 6.5 \text{CBR}^{0.65}$  (MPa) propuesta por Jeuffroy y Bachéles. Esta fórmula parece pesimista sobre los suelos buenos, cuando se interpretan medidas de deflexión.
- La fórmula  $E = 10 \text{ CBR}$  (MPa) propuesta por la Shell, liga el módulo dinámico al valor del CBR. El módulo dinámico es siempre superior al estático, luego esta fórmula sobrestima el módulo de los suelos.
- Se recomienda tomar el módulo como  **$E = 5 \text{ CBR}$  (en MPa)** ó  $8,5 \text{ CBR}^{0.825}$  (MPa).

Se destaca la gran importancia de este valor de E, ya que es vital en el cálculo del valor límite de  $\varepsilon_z$ .

En el caso de las calzadas flexibles y bituminosas de gran espesor el cuerpo de la calzada debe ser dimensionado para evitar que el ahuellamiento del soporte por acumulación de las deformaciones permanentes a este nivel llegue a deformarlo.

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:

**Tabla 9**  
**Deformación Admisible en función del Tránsito**

<b>PAVIMENTO CON TRÁNSITO MEDIO A ALTO (T3 a T5)</b>	$\varepsilon_z = 0.012(N)^{-0.222}$
<b>PAVIMENTO CON TRÁNSITO BAJO (T1 Y T2 )</b>	$\varepsilon_z = 0.016(N)^{-0.222}$

Fuente: diseño método racional (Fredy A. Reyes Lizcano)

#### **2.1.4.3. CAPA BASE Y CAPA SUB-BASE**

En lo que concierne a la selección de la capa de base y en la verificación del dimensionamiento del cuerpo de la calzada, dos aproximaciones son empleadas en la

práctica, la primera es la más tradicional y consiste en el seleccionamiento del espesor de la capa de sub-base en función de la importancia del suelo soporte, en donde se asimila para los cálculos de la verificación de los espesores de suelo soporte más capa de sub-base, un proceso de tener un masivo homogéneo que es descrito por el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, se verifica el criterio sobre la deformación vertical que satisfaga los valores admisibles de la subrasante.

En el segundo método la capa de sub-base se individualiza como una capa de calzada más en el cálculo de la estructura, esta aproximación es válida en el caso donde se busca optimizar los espesores del conjunto de calzada y de la capa de sub-base en función de las características mecánicas que pueden ser obtenidas en obra con los materiales de sub-base. En este segundo caso las características mecánicas de estos materiales deben ser determinadas estrictamente en laboratorio. Cuando se utilizan capas de sub-base en materiales no tratados se debe verificar que los valores de la deformación vertical en la parte superior de la capa de la sub-base y del suelo soporte son admisibles y cuando se utilizan materiales tratados se debe verificar la leyes de fatiga adoptando los modelos propios para el caso del material que se esté utilizando.

#### **2.1.4.4. GRAVAS NO TRATADAS**

El método de cálculo que se requiere para representar el comportamiento reversible bajo una carga está dado en función del modulo de Young y del coeficiente de Poisson para una grava no tratada como se muestra en la tabla N° 10

#### **2.1.4.5. MATERIALES PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Las características mecánicas de los materiales bituminosos dependen de la temperatura y de la frecuencia de la sollicitación, el cálculo debe ser hecho para

valores representativos de las condiciones propias del proyecto. La frecuencia de sollicitación que debe evaluarse es a 10 Hz.

El método de cálculo necesita para representar el comportamiento reversible bajo una carga el valor del módulo de Young E, el coeficiente de Poisson será tomado en promedio alrededor de 0.35.

**Tabla 10**  
**Valores del Módulo de Young de Capas de Gravav no tratadas**

PAVIMENTO DE BAJO TRÁNSITO T1 A T3			
CAPA DE BASE	CATEGORÍA 1* $E_{GNT} = 600$ MPa CATEGORÍA 2* $E_{GNT} = 400$ MPa CATEGORÍA 3* $E_{GNT} = 200$ MPa		
CAPA DE SUB-BASE (GNT sub-dividida en sub-capas de 0.25 m de espesor)	$E_{GNT} [1] = k E$ plataforma de soporte $E_{GNT} [\text{sub-capas } I] = k E_{GNT} [\text{sub-capas}(1-i)]$ k depende de la categoría de la GNT		
CATEGORÍA	1	2	3
K	3	2.5	2
$E_{GNT}$ LIMITADA POR EL VALOR INDICADO EN LA CAPA DE LA BASE			
PAVIMENTO TRÁNSITO T4 Y T5			
CAPA DE SUB-BASE (GNT subdividida en sub-capas de 0.25 m de espesor)	$E_{GNT} [1] = 3 E$ plataforma de soporte $E_{GNT} [\text{sub-capas } i] = 3 E_{GNT} [\text{sub-capas } (i-1)]$ $E_{GNT}$ limitada por 360 MPa		
ESTRUCTURA INVERSA	$E_{GNT} = 480$ Mpa		
Los diferentes valores del módulo según el tipo de estructura tienen en cuenta el carácter no lineal de las GNT (Módulo más elevado en capa de base que en la sub-base)			

Fuente: diseño racional de pavimentos (Fredy A. Reyes Lizcano)

La relación de Poisson se puede tomar en un rango de: 0.35 a 0.50 según criterio del diseñador.

## **2.2. PROGRAMA DE APOYO KENPAV**

Para realizar este trabajo de investigación y cumplir con los objetivos trazados, utilizaremos el programa KENPAV, por lo que a continuación explicamos en forma resumida en que consiste dicho programa.

KENPAV es un software desarrollado para trabajar en un ambiente Windows, elaborado en Colombia por la Pontificia Universidad Javeriana.

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 rehabilitación a la estructura diseñada.

El programa se caracteriza por el avalúo de esfuerzos y deformaciones, en las diferentes capas de los pavimentos, debido a las cargas por tráfico aplicadas durante el periodo de diseño, entre otras.

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, por lo que explicaremos de una forma rápida cómo se maneja:

**El programa mostrará un menú:** El cual aparecerá al momento de ingresar como se muestra en la figura 20.



**Figura 20 Menú del programa**

**Inicio:** Para iniciar el manejo del programa, se puede recurrir al menú, a íconos o a teclas, existiendo dos formas:

a) A través de íconos



Permite diseñar una nueva estructura de pavimento.



Permite abrir una estructura de pavimento existente.

b) El usuario tendrá la posibilidad de seleccionar cualquiera de estas dos opciones por medio del conjunto de teclas específicas en el menú desplegable “Archivo” de la ventana principal.

Cálculo del tráfico.

Selección del tipo de estructura (1.....9).

Cálculos.

Resultados.

Terminar o salir.

Cada una de las alternativas o tipo de estructura que presenta el programa requiere de la siguiente información (parámetros).

- Radio de contacto de carga (m).
- Presión de contacto (Mpa)
- Distancia entre ejes de llantas (m)
- Módulo de elasticidad de cada capa  $[E]$  en (Mpa).
- Coeficiente de Poisson de cada capa  $[\nu]$
- Espesor de cada capa  $[H]$  en (m)
- Tipo de interfase entre capas (Ligada o no ligada)

El procedimiento del manejo del programa se podrá explicar, más adelante cuando se esté realizando los cálculos requeridos para nuestro análisis.

### **2.3. CARACTERÍSTICAS DE CADA TIPO DE RODADURA**

Como ya mencionamos, existen varios tipos de rodadura que su función principal es ofrecer una superficie cómoda y segura al tráfico vehicular, también trabaja como impermeabilizante evitando la filtración de agua a las capas inferiores de la estructura, asimismo la superficie de rodadura contribuye a aumentar la capacidad soporte del pavimento, absorbiendo cargas, si su espesor es apreciable (mayor a 4

centímetros), excepto el caso de riegos superficiales, ya que para éstos se considera nula, es por lo que consideramos importante describir sus características de cada tipo de rodadura.

### 2.3.1. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Los tratamientos superficiales se obtienen aplicando una cantidad de material asfáltico y agregados adecuados, sobre una capa base flexible apropiadamente construida para suministrar una superficie de desgaste adecuada para el tránsito. Los tratamientos superficiales se usan para proteger la capa base y para eliminar el problema del polvo en la superficie de desgaste. En un tratamiento superficial simple que se considera como una capa individual los espesores varían de 12.70 a 19.05 mm. Y para un tratamiento doble o triple los espesores a considerar varían de 22.22 a 50.80 mm.

Las características que se deben considerar en este tipo de rodadura:

- **Ligantes.-** Si bien se utiliza los asfaltos 80/100 y 80/200, éstos no son aconsejables; se prefiere la emulsión catiónica de rompimiento rápido al 60% de asfalto 80/100.
- **Agregados.-** Deben provenir de rocas duras no estar contaminados y tener una forma que permita la adherencia del asfalto.
- **Dureza.-** Este parámetro se caracteriza por la resistencia a la fricción, a la fragmentación y al pulimento.
- **Limpieza y adherencia.-** La limpieza de los granulares es una condición muy importante para la obtención de buenos tratamientos superficiales. Recaracteriza por el porcentaje que pasa el tamiz 0.5% mm, el cual debe ser inferior a 2% en el caso de tránsitos bajos y menor de 0.5% para tránsitos elevados.

Una mala adherencia no sólo se debe a la presencia de polvo en el material, sino también a la misma naturaleza de la roca, por lo que ande aplicarse aditivos en el caso de tener granulares silíceos como el cuarzo, el gres y la riolita.

- **Dimensión de los granulares.**- Se utiliza por lo general las dimensiones en función de las condiciones locales, como por ejemplo 5/15 – 15/25 – 6/10 – 10/14 – 14/18, o con discontinuidades 6/10 – 14/18.

- **Dosificación.**- Se recomienda el empleo del ábaco de Shell, que da muy buenos resultados.

### 2.3.2. CARPETA ASFÁLTICA

La carpeta asfáltica es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodadura, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir, las principales características que debe cumplir el pétreo son las siguientes:

- Los granulares que entran en la composición son gravas trituradas con un diámetro menor de una pulgada y tener una granulometría adecuada.
- deberá tener cierta dureza para lo cual se le efectuarán los ensayos de desgaste los ángeles, intemperismo acelerado, densidad y durabilidad.
- la forma de la partícula deberá ser lo más cúbica posible, recomendamos no usar material en forma de laja o aguja pues se rompen con facilidad alterando la granulometría y pudiendo provocar fallas en la carpeta, se efectuarán pruebas de equivalente de arena ya que los materiales finos en determinados porcentajes no resultan adecuados.

En las mezclas asfálticas, es de gran importancia conocer la cantidad de asfalto por emplearse, debiéndose buscar un contenido óptimo; ya que en una mezcla este elemento forma una membrana alrededor de las partículas de un espesor tal que sea

suficiente para resistir los efectos del tránsito y de la intemperie, pero no debe resultar muy gruesa ya que además de resultar antieconómica puede provocar una pérdida de la estabilidad en la carpeta, además este exceso de asfalto puede hacer resbalosa la superficie, para calcular este óptimo se tienen las pruebas de compresión simple para mezclas en frío, la prueba Marshall para muestras en caliente y la prueba de Hveem. Para conocer la adherencia entre el pétreo y el asfalto se pueden utilizar pruebas de desprendimiento por fricción, pérdida de estabilidad o bien, cubrimiento por el método inglés; en caso de que las características del pétreo no sean aceptables, se pueden lavar o bien usar un estabilizante para cambiar la tensión superficial de los poros.

El tipo y espesor de una carpeta asfáltica se elige de acuerdo con el tránsito que va a transitar por ese camino, y los espesores pueden variar desde 4 cm., hasta 15 cm.

### **2.3.3. CARPETA DE HORMIGÓN O CONCRETO**

Las losas de los pavimentos de concreto hidráulico o pavimento rígido son los que se constituyen en la capa de rodadura, este tipo de rodadura tiene las siguientes características:

El concreto es una mezcla como piedras, gravas y arena aglomeradas, que con la ayuda de un ligante hidráulico (cemento) fraguara una vez que la mezcla se haya combinado con el agua.

El cemento mezclado con una cantidad de agua suficiente forma una pasta blanda que guarda la misma consistencia durante un tiempo, la cual es característica de su naturaleza de sus constitutivos y de la fineza de su textura. En un momento dado, se produce un aumento brusco de la viscosidad de la pasta y una liberación de calor, que se llama el inicio de fraguado; a su vez el final del fraguado se define como el momento en que la pasta deja de ser deformable.

Luego de terminado el fraguado, sigue el endurecimiento. El concreto se vuelve un material con elevada resistencia mecánica y módulo elástico alto. Un concreto para carretera debe tener una resistencia media a la tracción por flexión que pase de 5 Mpa y un módulo elástico del orden de 40 Gpa. Estas características mecánicas asegura que las losas de concreto queden dimensionadas convenientemente, con una baja deformación ante el paso de las cargas pesadas, y permite una buena repartición de las presiones.

Este tipo de rodadura tiene poca resistencia a la flexión, que les permite sostener una acción como de viga a través de las irregularidades en el material subyacente, y los espesores generalmente varían de 15 a 30 cm, dependiendo siempre de previo análisis.

#### **2.4. DEFORMACIÓN PARA CADA TIPO DE RODADURA**

El análisis deformacional en cada tipo de rodadura en el diseño de pavimentos flexibles, es muy importante, ya que permite el control de las deformaciones en la estructura de los pavimentos, incluyendo el terreno de fundación. Las deformaciones acumuladas desde las capas profundas del suelo de fundación se traducen finalmente, en las deflexiones superficiales. Desde este enfoque consideramos vital el conocimiento de los tipos de daños que sufre un pavimento flexible, y los podemos clasificar en 4 y son:

- Fisuras
- Deformaciones
- Perdida de capas estructurales
- Daños superficiales

Consideramos que es muy importante el estudio de cada tipo de daño que sufren los pavimentos flexibles, pero debido a nuestro estudio sólo analizaremos las deformaciones las cuales las podemos clasificar en:

- Deformaciones plásticas (Roderas)
- Canalizaciones (blandones)
- Baches profundos
- Ondulaciones

#### 2.4.1. DEFORMACIONES PLÁSTICAS

Las deformaciones plásticas son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento y es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.



**Figura 21 Deformaciones permanentes (roderas) en pavimentos flexibles**

Las deformaciones plásticas se caracterizan principalmente por una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original, asociado a temperaturas relativamente altas.

El comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la formación de roderas está íntimamente relacionado con el tipo de ligante asfáltico, la composición granulométrica y calidad de los agregados pétreos y aditivos (en ciertos casos) empleados en la fabricación de la mezcla.

La acumulación de deformaciones plásticas en una capa de concreto asfáltico pueden ser causadas por una reducción volumétrica del material que compone la mezcla asfáltica y por las deformaciones debidas a los esfuerzos cortantes que transmiten las cargas del tráfico.

#### **2.4.1.1. TIPOS DE RODERAS**

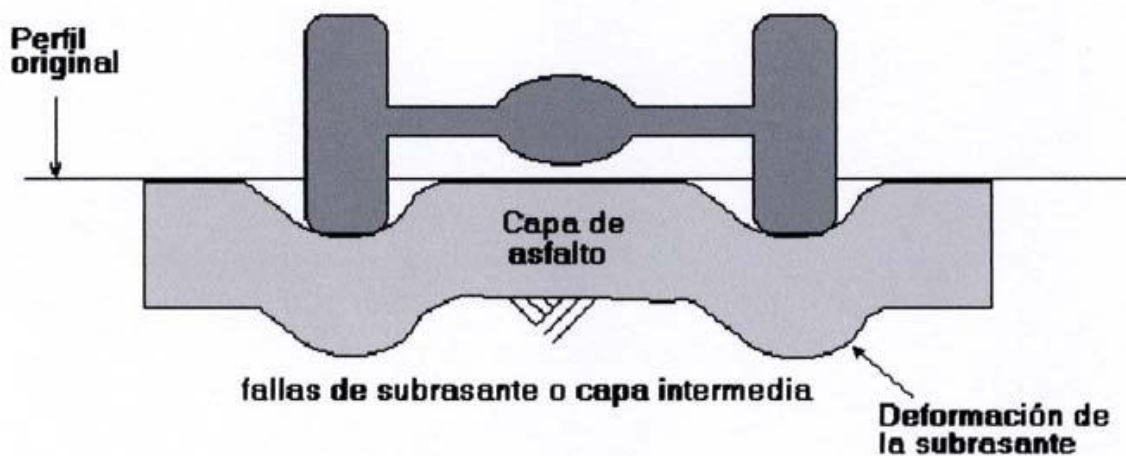
La deformación plástica permanente se caracteriza por una sección transversal del pavimento que no se encuentra en la posición original de diseño, se llama permanente, porque representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irrecuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga. Existen dos principales tipos de roderas: roderas por fallas en la subrasante y roderas por fallas en la capa de asfalto, esta última, de gran interés, debido a que representa el tema principal de este trabajo.

Las deformaciones permanentes se pueden apreciar visiblemente como depresiones o canales a lo largo de la trayectoria por donde ruedan los vehículos en el pavimento. La densificación de material es un fenómeno secundario dentro de la formación de roderas, potencialmente contribuye en menos de 5 mm, en la profundidad de la rodera. Otras causas que influyen en la producción de hundimientos en los pavimentos asfálticos son los espesores delgados de pavimento, pérdida de material

en la superficie por donde ruedan los vehículos y deformaciones plásticas en la capa de asfalto.

#### a) Roderas por fallas en la subrasante

Son causadas por un excesivo esfuerzo repetido en las capas interiores (base o sub-base) bajo la capa de asfalto. Aunque los materiales duros pueden reducir este tipo de roderas, es considerado un problema estructural, más que de los materiales entre sí. Esencialmente, no hay suficiente fuerza en el pavimento o dureza para reducir la fuerza aplicada en un nivel tolerable. También puede ser causado por un inesperado debilitamiento de una de las capas generadas por la intrusión de humedad. La deformación ocurre en las capas inferiores.



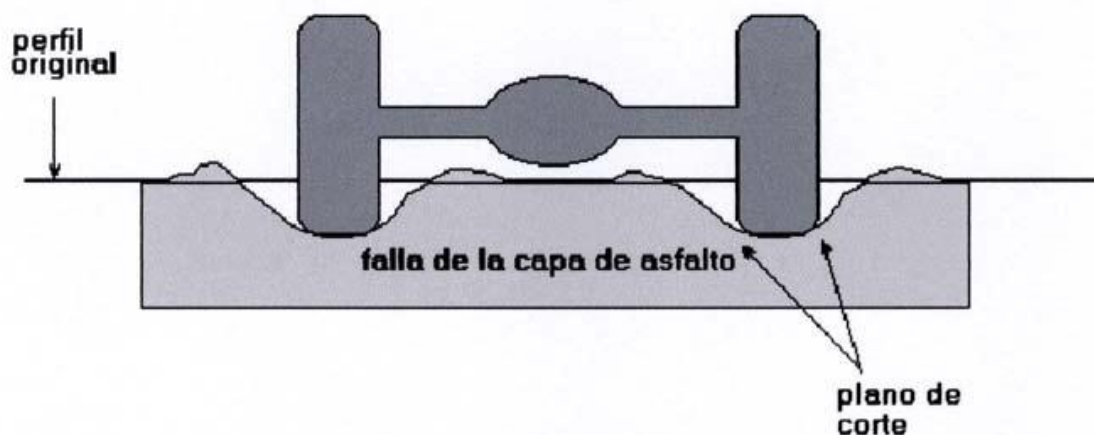
**Figura 22 Deformación de la subrasante**

Las cargas de tráfico provocan hundimientos y debilitamiento, por debajo en la estructura del pavimento. Si la capa de pavimento es suficientemente flexible, se deformará por tener espesores delgados. Los hundimientos por roderas tienden a ser de anchos que van desde los 750 mm., hasta los 1000 mm., con poca profundidad y formas curvadas cruzando la sección del pavimento sin fisurarse. Si se hiciera una zanja o corte, la deformación de pavimento indicaría, que el espesor del pavimento permanece constante y cualquiera de las capas granulares (base o sub-base) tiene deformaciones. Si la estructura del pavimento es lo suficientemente rígida a la deformación, ocurrirán fisuras por fatiga de un lado a otro en el ancho entero de la

trayectoria de la llanta. Algunas veces atravesando toda la sección del pavimento, parecería un tipo de falla por punzonamiento, con piezas quebradas empujadas hacia abajo. Algunas roderas tienden a presentar pendientes pronunciadas con bordes quebrados en ambos lados de la trayectoria de la rueda.

#### **b) Roderas por fallas en la capa de asfalto o capa de rodadura**

Es el tipo de roderas que más preocupa a los diseñadores de mezclas asfálticas, se produce debido a la escasez de la capacidad portante o a la insuficiencia de soportar cargas pesadas, una mezcla asfáltica débil, va acumulando una pequeña pero permanente deformación plástica, en cada pulso de carga pesada, y eventualmente forma una ruta caracterizada con una inclinación y deslizamiento lateral de la mezcla, las roderas pueden ocurrir en la capa superficial de asfalto o debido a debilitamiento en las capas inferiores de asfalto.



**Figura 23 Deformación de la capa de rodadura**

Las roderas en una mezcla débil ocurren típicamente durante el verano, cuando el pavimento se encuentra sometido a temperaturas altas, esto podría sugerir que las roderas son causadas por el sol, pero es más correcto pensar, que es una combinación de la resistencia de los agregados pétreos y el ligante asfáltico empleado. Las roderas como se ha dicho antes son la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes y una manera de incrementar la fuerza contra el deslizamiento es no solamente utilizar asfaltos más duros, sino otro que se comporte más como un sólido elástico a altas temperaturas. Así cuando se aplique la carga el material podrá deformarse y

volver a su posición original. Otra manera de prevenir los desplazamientos es seleccionar agregados que tengan un alto grado de fricción interna, que sea cúbico, que tenga una superficie rugosa y pueda desarrollar un grado de contacto partícula a partícula. Cuando se le aplica una carga a una mezcla asfáltica, las partículas de los agregados se cierran unidas de tal manera que funcionan como una sola, larga y elástica piedra, y como el asfalto actuará como una banda de goma, volverá a su forma original cuando desaparezca la carga, de esta forma no se acumula una deformación permanente.

#### **2.4.2. CANALIZACIONES (BLANDONES)**

Este tipo de deformaciones se caracteriza por la deformación del perfil transversal, tanto por hundimiento a lo largo de las rodadas como por elevación de las áreas vecinas adyacentes a las rodadas. Las deformaciones presentan una configuración más amplia que las rodadas como se muestra a continuación:



**Figura 24 Aspecto superficial de canalizaciones en pavimentos flexibles**

Las profundidades máximas de las canalizaciones, es medida a partir de una regla colocada transversalmente sobre las elevaciones laterales, cada 100 m o más. Existen

canalizaciones ligeros que son menores a 2 cm., medianos que encuentra entre 2 a 4 cm., y fuertes que son mayores a 4 cm., generalmente este tipo de falla se presenta debido a la capacidad estructural del pavimento insuficiente.

### **2.4.3. BACHES PROFUNDOS**

Es el hundimiento local de la calzada, con agrietamiento en malla cerrada y generalmente pérdida parcial de bloques de la capa de rodadura (carpeta).

Es la desintegración total de la carpeta asfáltica que deja expuestos a los materiales granulares lo cual lleva al aumento del área afectada y el aumento de la profundidad debido a la acción de tránsito. Dentro de este tipo de deterioro se encuentran los ojos de pescado que corresponden a baches de forma redondeada y profundidad variable, con bordes bien definidos que resultan de una deficiencia localizada en las capas estructurales.



**Figura 25 Aspecto superficial de un bache profundo en pavimentos flexibles**

Este tipo de deterioro puede presentarse por la retención de agua en zonas fisuradas que ante la acción del tránsito produce reducción de esfuerzos efectivos generando deformaciones y la falla del pavimento. Este deterioro ocurre siempre como evolución de otros daños, especialmente de piel de cocodrilo.

También es consecuencia de algunos defectos constructivos (por ejemplo, carencia de penetración de la imprimación en bases granulares) o de una deficiencia de espesores de capas estructurales. Puede producirse también en zonas donde el pavimento o la subrasante son débiles. Se presentan también de diferentes profundidades, que se pueden clasificar en:

- Baja: profundidad de afectación menor o igual a 25 mm, corresponde al desprendimiento de tratamientos superficiales o capas delgadas.
- Media: Profundidad de afectación entre 25 mm y 50 mm, deja expuesta la Base.
- Alta: Profundidad de afectación mayor de 50 mm, que llega a afectar la base granular.

#### **2.4.4. ONDULACIONES**

Este tipo de deterioro es también conocida como corrugación o rizado, es un daño caracterizado por la presencia de ondas en la superficie del pavimento, generalmente perpendiculares a la dirección del tránsito, con longitudes entre crestas usualmente menores de 1.0 m.



**Figura 26 Aspecto superficial de ondulaciones en pavimentos flexibles**

La ondulación es una deformación plástica de la capa asfáltica, debido generalmente a una pérdida de estabilidad de la mezcla en climas cálidos por mala dosificación del asfalto, uso de ligantes blandos o agregados redondeados. Muchos de los casos suelen presentarse en las zonas de frenado o aceleración de vehículos.

Otra causa puede estar asociado a un exceso de humedad en la subrasante, en cuyo caso el daño afecta toda la estructura del pavimento. Además también puede ocurrir debido a la contaminación de la mezcla asfáltica con finos o materia orgánica. También se pueden clasificar en diferentes profundidades:

- Baja: profundidad máxima menor que 10 mm, causa poca vibración al vehículo, la cual no genera incomodidad al conductor.
- Media: Profundidad máxima entre 10 mm y 20 mm, causa una mayor vibración al vehículo generando incomodidad al conductor.
- Alta: Profundidad máxima mayor que 20 mm, causa una vibración excesiva que puede generar un alto grado de incomodidad, haciendo necesario reducir la velocidad por seguridad.

#### **2.4.5. DAÑOS EN LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS**

Los daños o deterioros que sufren los pavimentos de concreto hidráulico son similares a los producidos en los pavimentos flexibles, aunque se producen de diferente manera y sus efectos son distintos, debido al diferente comportamiento mecánico de ambos grupos. Los cuales se pueden clasificar en:

- Deformaciones
- Grietas
- Deterioro de las juntas
- Deterioro superficial

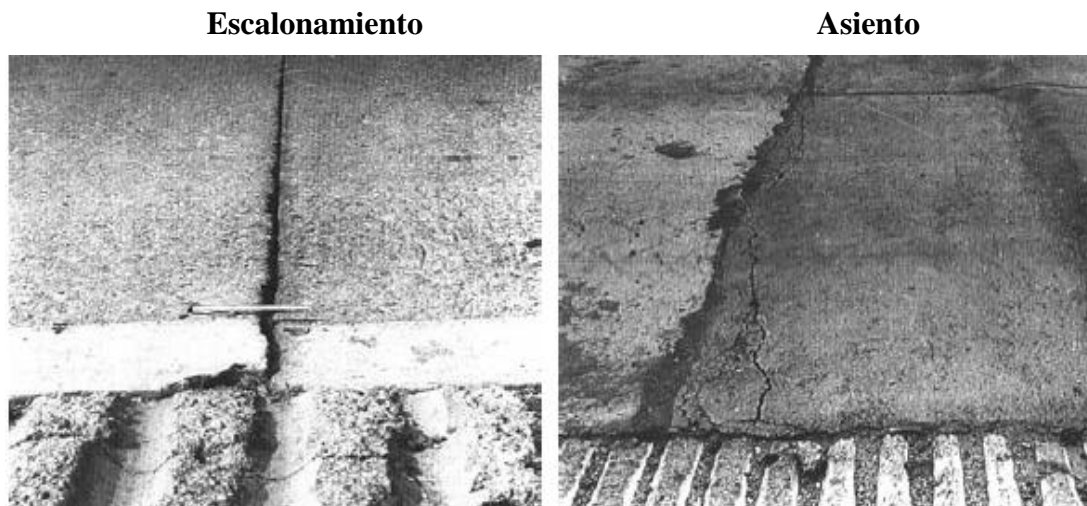
En nuestro estudio sólo consideraremos las deformaciones y grietas que sufren los pavimentos rígidos.

#### 2.4.5.1. DEFORMACIONES

Este tipo de deterioro afectan a la geometría del pavimento, pudiéndose producir discontinuidades en las losas que provoquen su deterioro a largo plazo. Los más frecuentes en este tipo de firmes son el escalonamiento y el asiento.

**Escalonamiento.-** Se da cuando un borde en una junta aparece hundido y el otro levantado, y normalmente está producido por un asiento diferencial de la explanada o debido a la acción del tráfico en losas agrietadas o con juntas sin pasadores.

**Asiento.-** Descenso de la superficie de la carretera. Esta causado por la deformación permanente de la explanada debido a una compactación insuficiente, acción del hielo o variaciones en el contenido de humedad.



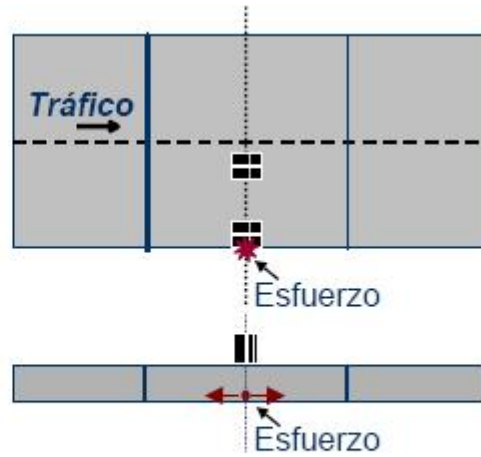
**Figura 27 deformaciones en pavimentos rígidos**

#### 2.4.5.2. GRIETAS

En este tipo de pavimentos, otro de los deterioros que usualmente se consideran como esenciales, sin ser los únicos, son el agrietamiento por fatiga. Para el caso del

agrietamiento por fatiga, éste se puede propagar iniciando a partir del fondo de la losa o bien desde la superficie. El inicio del agrietamiento se debe al desarrollo de esfuerzos críticos de tensión en la losa de concreto en ciertas ubicaciones dentro del pavimento, como se muestra en la fig.

a) Agrietamiento iniciando desde abajo



b) Agrietamiento iniciando en superficie



**Figura 28** Tipos de agrietamiento por fatiga considerados en pavimentos rígidos

Los modelos de deterioro para el caso de agrietamiento por fatiga relacionan el número de repeticiones  $N$  admisible con el nivel de esfuerzos aplicado, usualmente empleando la relación de esfuerzos  $SR$ , definida como el cociente entre el esfuerzo  $\sigma$  de tensión máximo esperado en el fondo de la losa y el valor de la resistencia a la tensión del concreto medida con base en el módulo de ruptura  $Mr$ , es decir,

$$SR = \frac{\sigma}{Mr} \quad (2.4)$$

La forma matemática del modelo de deterioro, que se da sólo a manera de ejemplo, es del tipo

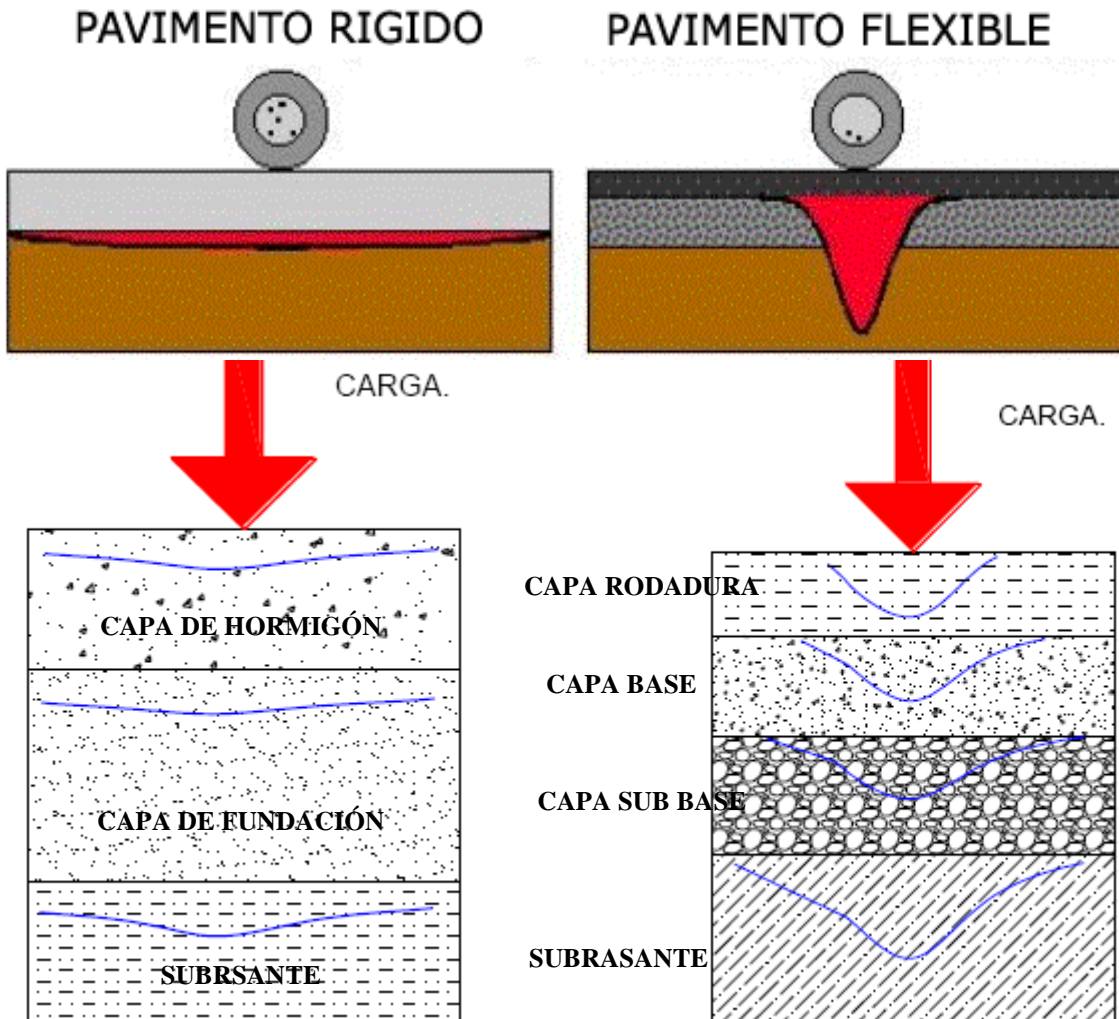
$$\text{Log } N = 2.81SR^{-1.22} \quad (2.5)$$

En donde las constantes dependen del tipo de concreto que se utilice; por ello se debe validar para su aplicación en cada país.

## **2.5. ANÁLISIS DE INFLUENCIA, TIPO DE RODADURA VS. DEFORMACIÓN**

El análisis deformacional se realiza a través de programas computacionales, que permiten la solución del problema elástico, ya que la deflexión es un parámetro utilizado para verificar la capacidad estructural de un pavimento. La llanta no sólo genera esfuerzos verticales sino también esfuerzos horizontales. En un diseño convencional de pavimento los esfuerzos horizontales se disipan a través de la carpeta asfáltica, pasando de un valor positivo en la superficie a uno negativo en su fibra inferior, en este trabajo realizaremos y nos abocaremos específicamente, como es el comportamiento deformacional de cada tipo de rodadura debido a la variación de sus espesores, a través de este análisis podremos ver también como afecta a toda la estructura del pavimento. Este análisis se realizará con la ayuda del programa computacional kenpav, en los dos tipos de pavimentos existentes en nuestro medio, flexible y rígido, con los resultados obtenidos se podrá demostrar que los pavimentos

flexibles al tener menor rigidez en la capa de rodadura se deforma más y se producen mayores tensiones en la subrasante que los pavimentos rígidos como se muestra en las figuras a continuación.



**Figura 29 Deformaciones en Pavimentos Rígidos y Flexibles**

### 2.5.1. ANÁLISIS Y APLICACIÓN

Para realizar el análisis deformacional de cada tipo de rodadura en la red vial departamental, se adquirió la información necesaria de algunos proyectos del servicio departamental de caminos SEDECA, los cuales por ser una institución seria y

responsable son válidos para realizar este análisis, y los proyectos tomados en cuenta para este análisis son los siguientes:

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA, DISEÑO FINAL E IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CARRETERA “ISCAYACHI - TOJO – CARRETAS”.**

El tramo vial “ISCAYACHI – TOJO – CARRETAS” con aproximadamente 83.00 Km., pertenece a la RED VIAL DEPARTAMENTAL, ha sido definida como prioridad por el Plan Vial Departamental, pues formará parte del Corredor Bioceánico Central Sud, por otra parte vincula a Tarija con Poblaciones Fronterizas importantes como ser Villazón. Dentro de la Red Vial Departamental, está definida como RUTA N° D 611.

El tramo “Iscayachi – Tojo – Carretas” recae íntegramente en el Departamento de Tarija, en su recorrido longitudinal de Sur a Sur Oeste en el sub tramo Iscayachi - Yunchará y de Este a Oeste en el sub tramo Yunchará – Carretas; atraviesa por la provincias Méndez y Avilés de nuestro Departamento.

El tramo básicamente está ubicado en la Segunda Sección de la Provincia Méndez, en el Cantón Iscayachi, perteneciente al Municipio de El Puente, y en la Segunda Sección de la Provincia Avilés, perteneciente al Municipio de Yunchará.



**Figura 30 Se muestra parte de la carretera Iscayachi-Tojo-carretas**

Nace en Iscayachi, pasa por Varias Comunidades Intermedias como ser Campanario, Pueblo Viejo, Chorcoya Méndez, Chorcoya Avilés, Pujzara, Tajzara, Pasajes; llega a Yunchará Capital de la Segunda Sección de la Provincia Avilés, pasa por Tojo y llega hasta Carretas, que es una comunidad que se encuentra en el límite con el Departamento de Potosí. Y los datos obtenidos son los siguientes:

### **Módulo Plataforma Soporte:**

Los ensayos mencionados anteriormente para caracterizar los materiales son muy costosos y no son accesibles todavía en nuestro medio, por lo que el método racional de pavimentos nos recomienda tomar para el cálculo del módulo elástico de la subrasante la siguiente fórmula:

$$E_{SR} = 5 * CBR \text{ (MPa)} \quad (2.6)$$

Es necesario clasificar los terrenos en nuestro medio en función del CBR de la subrasante:

Subrasante Mala ----- < 3% de CBR

Subrasante Regular ----- 3% - 9% de CBR

Subrasante Buena ----- > 9% de CBR

Para poder realizar la aplicación practica el CBR=10% calculado en el proyecto que estaría clasificado dentro del terreno bueno, por lo que calculamos el módulo de la subrasante:

$$E_{SR} = 5 * 10 \rightarrow E_{SR} = 50 \text{ (MPa)}$$

### **Módulos de Capas:**

Para determinar las características de los materiales granulares se usó el criterio de fijar el módulo de una capa en función del módulo de la capa subyacente, y del espesor de la capa en mm.

### Módulo de Capa de Rodadura:

Se adoptó el valor de 5400 MPa que viene por defecto en el programa para el módulo de la capa de rodadura para pavimento flexible y el espesor será nuestra variable.

### Módulo de Capa Base:

Existen tres tipos de materiales para determinar los módulos de la capa base, y tienen las siguientes características:

CATEGORÍA 1* E GNT = 600 MPa	---	Capa Base de Características óptimas
CATEGORÍA 2* E GNT = 400 MPa	---	Capa Base de Características regulares
CATEGORÍA 3* E GNT = 200 MPa	---	Capa Base de Características mínimas

Para la capa sub-base se tiene una grava no tratada, cuyo módulo de Young para un espesor de 25 cm de subcapa varía así:

**Tabla 11 Módulo de Young**

CATEGORÍA	1	2	3
K	3	2.5	2

Fuente: diseño racional de pavimentos (Fredy A. Reyes Lizcano)

K depende de las características de la GNT de la capa, en función del módulo de la capa subrasante se calculará el módulo de la sub base con la siguiente fórmula:

$$E_{sb} = K * E_{SR} \quad (2.7)$$

$$E_{sb1} = 3 * 50 = E_{sb1} = 3 * 50 = 150 \text{ MPa}$$

$$E_{sb2} = 2.5 * 50 = E_{sb1} = 2.5 * 50 = 125 \text{ MPa}$$

$$E_{sb3} = 2 * 50 = E_{sb1} = 2 * 50 = 100 \text{ MPa}$$

**Relación de Poissón:**

A falta de ensayos o valores particulares para cada tipo de estos materiales el coeficiente de Poisson asumido y recomendado tendrá un valor 0.35

**Tráfico:**

Es importante mencionar que el método racional de diseño de pavimentos sólo considera el tránsito pesado, es por eso que a continuación se calcula y proyecta, con una tasa de crecimiento adoptado en el proyecto  $i = 6,2 \%$

**Proyección del TPDA**

Para el cálculo de la proyección del TPDA se utilizó las fórmulas que utiliza el método racional de pavimentos, es necesario aclarar que el método racional sólo considera los vehículos pesados, es por eso se tuvo que clasificar en la siguiente tabla:

**Tabla 12 CLASIFICACIÓN DE TRANSITO PESADO**

CLASE DE VEHICULO		PROMEDIO	
		Cantidad Vehículos	%
Ómnibuses y Colectivos	3.micro (hasta 21 asientos)	0	0,00
	4.bus mediano (22 a35 asientos)	2	5,83
	5.bus grande (más de 36 asientos)	11	29,45
Camiones	6.camión pequeño (hasta 5,5 ton)	4	11,77
	7.camión mediano (de 6 ton 9,5 ton)	0	0,00
	8.camión grande (10 ton ó más)	16	44,08
	9.camión con acoplado	3	8,82
Total:		<b>36</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia

El tráfico se proyecto para:

n= igual a 6 años para tratamientos superficiales (simple, doble, triple) y los espesores calculados en el proyecto son:

Espesor capa sub base = 30 cm. asumimos 25 cm.

Espesor capa base = 20 cm.

Espesor capa de rodadura = 2.5 cm.

n= igual a 10 años para carpetas asfálticas

Espesor capa sub base = 20 cm.

Espesor capa base = 18 cm.

Espesor capa de rodadura = 5 cm.

## 2.5.2. PAVIMENTOS FLEXIBLES, TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

The screenshot displays the KENPAV software interface, titled "KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d". The main window shows a "Versión Demo" watermark and a toolbar. Two dialog boxes are open:

**CALCULO DEL TRAFICO** (Traffic Calculation):

- Opciones:**
  - Calcular Tráfico
  - CAM y N
- Variables:**
  - MJA: 36 (Número de vehículos pesados)
  - n: 6 (años) (Periodo de diseño)
  - i: 6.2 (%) (Tasa de Crecimiento Anual)
  - CAM: 0.5 (Coeficiente de Agresividad Media)
  - N: 0.092E6 (13 Ton) (Tráfico Acumulado)
- Equation:** 
$$N = 365 * MJA * \left( \frac{(1+i)^n - 1}{i} \right)$$
- Buttons:** "Borrar Datos" and "Continuar..."

**CARACTERISTICAS DEL DISEÑO** (Design Characteristics):

- 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 GRAYA CEMENTO
  - 5- ESTRUCTURA TRATADA CON LIGANTES HIDRAULICOS
  - 6- ESTRUCTURA MIXTA
  - 7- ESTRUCTURA INVERSA
  - 8- ESTRUCTURA CALZADA EN CONCRETO
  - 9- ESTRUCTURA CON EXISTENCIA DE AFIRMADO
- Number of Layers:** Número de Capas: 4
- Buttons:** "?", "X", and "Continuar >>"

The bottom part of the screenshot shows the same software interface with the "2- ESTRUCTURA CON TRAFICO BAJ..." dialog box open, displaying "NÚMERO DE CAPAS: 4".

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C.Asfaltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

**Información Conocida**

CAPAS: 4  
CAM: N  
0.5 0.092E6

**Parámetros de Diseño Utilizados**

Radio de Contacto: 0.662  
Presión de Contacto: 0.125  
Distancia entre Ejes: 0.375  
# Posiciones Eje: 3

**Información de la Estructura**

N°	Tipo	E (MPa)	v	H (m)
1	CAPA ASFALTICA	5400	0.35	0.01
2	BASE GRANULAR	200	0.35	0
3	GRAVA NO TRATADA	100	0.35	0.25
4	SUB-RASANTE	50	0.35	

TDS: C. Asfaltica

BASE GRANULAR

GRAVAS NO TRATADAS

SUBRASANTE

$\epsilon_{z,adm} = 0.016 (NE)^{-0.222}$

\* Todas las capas presentan ligamiento

CALCULAR

KENPAV - Esfuerzos y Deformaciones - v1.0d

CALCULO DEL TRAFICO MAYÚS NÚM

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C.Asfaltica) - Iteración B.G

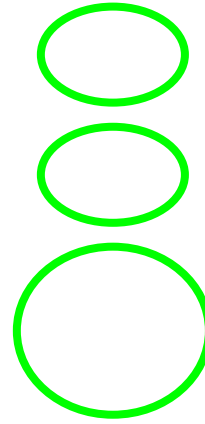
**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

**GRÁFICA  $E_z$  (aplic. adm) Vs H (espesores. m)**

Deformación Admisible

UBICACIÓN: SUBRASANTE

$\epsilon_{z,adm} = 1475.66E-06$



KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C.Asfaltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

**Información Conocida**  
 CAPAS: 4  
 CAM: N  
 0.5 0.092E6

**Parámetros de Diseño Utilizados**  
 Radio de Contacto: 0.662  
 Presión de Contacto: 0.125  
 Distancia entre Ejes: 0.375  
 # Posiciones Eje: 3

**Información de la Estructura**

N°	Tipo	E (MPa)	V	H (m)
1	CAPA ASFALTICA	5400	0.35	0.015
2	BASE GRANULAR	200	0.35	
3	GRAVA NO TRATADA	100	0.35	0.25
4	SUB-RASANTE	50	0.35	

TDS - C. Asfaltica

BASE GRANULAR

GRAVAS NO TRATADAS

SUBRASANTE

$\epsilon_{z,adm} = 0.016 (NE)^{-0.222}$

\* Todas las capas presentan ligamiento

CALCULAR

KENPAV - Esfuerzos y Deformaciones - v1.0d

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C.Asfaltica) - Iteración B.G

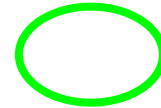
**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

**GRÁFICA Ez (aplic. adm) Vs H (espesores. m)**

Deformación Admisible

UBICACIÓN: SUBRASANTE

$\epsilon_{z,adm} = 1475.66E-06$



KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C.Asfaltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

**Información Conocida**  
 CAPAS: 4  
 CAM: N  
 0.5 0.092E6

**Parámetros de Diseño Utilizados**  
 Radio de Contacto: 0.662  
 Presión de Contacto: 0.125  
 Distancia entre Ejes: 0.375  
 # Posiciones Eje: 3

**Información de la Estructura**

N°	Tipo	E (MPa)	V	H (m)
1	CAPA ASFALTICA	5400	0.35	0.02
2	BASE GRANULAR	200	0.35	
3	GRAVA NO TRATADA	100	0.35	0.25
4	SUB-RASANTE	50	0.35	

TDS - C. Asfaltica

BASE GRANULAR

GRAVAS NO TRATADAS

SUBRASANTE

$\epsilon_{z,adm} = 0.016 (NE)^{-0.222}$

\* Todas las capas presentan ligamiento

CALCULAR

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

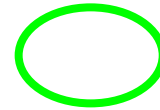
ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C.Asfaltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

**GRÁFICA  $\epsilon_z$  (aplic. adm) Vs H (espesores. m)**

—  $\epsilon_{z,adm}$  —  $\epsilon_{z,apl}$

**Deformación Admisible**  
 UBICACIÓN: SUBRASANTE  
 $\epsilon_{z,adm} = 1475.66E-06$



KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C.Asfaltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada**

**Información Conocida**  
 CAPAS: 4  
 CAM: N  
 0.5 0.092E6

**Parámetros de Diseño Utilizados**  
 Radio de Contacto: 0.662  
 Presión de Contacto: 0.125  
 Distancia entre Ejes: 0.375  
 # Posiciones Eje: 3

**Información de la Estructura**

N°	Tipo	E (MPa)	v	H (m)
1	CAPA ASFALTICA	5400	0.35	0.05
2	BASE GRANULAR	200	0.35	D
3	GRAVA NO TRATADA	100	0.35	0.25
4	SUB-RASANTE	50	0.35	

TDS - C. Asfaltica

BASE GRANULAR

GRAVAS NO TRATADAS

SUBRASANTE

$\epsilon_{z,adm} = 0.016 (NE)^{-0.222}$

\* Todas las capas presentan ligamiento

CALCULAR

KENPAV - Esfuerzos y Deformaciones - v1.0d

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C.Asfaltica) - Iteración B.G

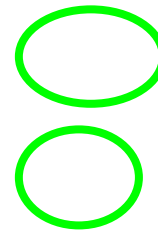
**Datos de Entrada**

**Resultados y Gráfica**

**Deformación Admisible**  
 UBICACIÓN: SUBRASANTE  
 $\epsilon_{z,adm} = 1475.66E-06$

**GRÁFICA Ez (aplic. adm) Vs H (espesores. m)**

— Ez,adm. — Ez,apl.



KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C.Asfaltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

**Información Conocida**

CAPAS: 4  
 CAM: N  
 0.5 0.092E6

**Parámetros de Diseño Utilizados**

Radio de Contacto: 0.662 | Presión de Contacto: 0.125 | Distancia entre Ejes: 0.375 | # Posiciones Eje: 3

**Información de la Estructura**

N°	Tipo	E (MPa)	v	H (m)
1	CAPA ASFALTICA	5400	0.35	0.01
2	BASE GRANULAR	400	0.35	D
3	GRAVA NO TRATADA	125	0.35	0.25
4	SUB-RASANTE	50	0.35	

TDS - C. Asfaltica

BASE GRANULAR

GRAVAS NO TRATADAS

SUBRASANTE

$\epsilon_{z,adm} = 0.016 (NE)^{-0.222}$

\* Todas las capas presentan ligamiento

CALCULAR

KENPAV - Esfuerzos y Deformaciones - v1.0d

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C.Asfaltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

**GRÁFICA Ez (aplic, adm) Vs H (espesores, m)**

— Ez,adm. — Ez,apl.

**Deformación Admisible**

UBICACIÓN: SUBRASANTE

$\epsilon_{z,adm} = 1475.66E-06$



KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C. Asfáltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

**Información Conocida**  
 CAPAS: 4  
 CAM: N  
 0.5 0.092E6

**Parámetros de Diseño Utilizados**  
 Radio de Contacto: 0.662  
 Presión de Contacto: 0.125  
 Distancia entre Ejes: 0.375  
 # Posiciones Eje: 3

**Información de la Estructura**

N°	Tipo	E (MPa)	v	H (m)
1	CAPA ASFALTICA	5400	0.35	0.01
2	BASE GRANULAR	600	0.35	0
3	GRAVA NO TRATADA	150	0.35	0.25
4	SUB-RASANTE		0.35	

Diagrama de la estructura de capas:  
 TDO - C. Asfáltica  
 BASE GRANULAR  
 GRAVAS NO TRATADAS  
 SUBRASANTE

$\epsilon_{z,adm} = 0.016 (NE)^{-0.222}$

\* Todas las capas presentan ligamiento

CALCULAR

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

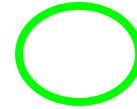
ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C. Asfáltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

**GRÁFICA Ez (aplic. adm) Vs H (espesores. m)**

— Ez,adm. — Ez,apl.

**Deformación Admisible**  
 UBICACIÓN: SUBRASANTE  
 $\epsilon_{z,adm} = 1475.66E-06$



### 2.5.3. PAVIMENTOS FLEXIBLES CARPETAS ASFÁLTICAS

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

Versión Demo

**CALCULO DEL TRAFICO**

Opciones

Calcular Tráfico 
$$N = 365 * MJA * \left( \frac{(1+i)^n - 1}{i} \right)$$

CAM y N

Variables

MJA: 100 (Número de vehículos pesados)

n: 10 (años) (Periodo de diseño)

i: 6.2 (%) (Tasa de Crecimiento Anual)

CAM: 0.5 (Coeficiente de Agresividad Media)

N: 0.175E6 (13 Ton) (Tráfico Acumulado)

Borrar Datos Continuar...

**CARACTERISTICAS 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 CEMENTO
- 5- ESTRUCTURA TRATADA CON LIGANTES HIDRAULICOS
- 6- ESTRUCTURA MIXTA
- 7- ESTRUCTURA INVERSA
- 8- ESTRUCTURA CALZADA EN CONCRETO
- 9- ESTRUCTURA CON EXISTENCIA DE AFIRMADO

Número de Capas: 4 Continuar >>

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

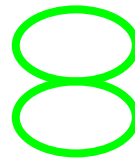
Archivo Editar Diseño Ayuda

Versión Demo

**2- ESTRUCTURA CON TRAFICO BAJ...**

NÚMERO DE CAPAS: 4

Optimizar



KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C. Asfáltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

**Información Conocida**

CAPAS: 4  
CAM: 0.5, 0.175E6

**Parámetros de Diseño Utilizados**

Radio de Contacto: 0.662 | Presión de Contacto: 0.125 | Distancia entre Ejes: 0.375 | # Posiciones Eje: 3

**Información de la Estructura**

N°	Tipo	E (MPa)	v	H (m)
1	CAPA ASFALTICA	5400	0.35	0.05
2	BASE GRANULAR	200	0.35	0
3	GRAVA NO TRATADA	100	0.35	0.18
4	SUB-RASANTE	50	0.35	

TDS - C. Asfáltica

BASE GRANULAR

GRAVAS NO TRATADAS

SUBRASANTE

$\epsilon_{z,adm} = 0.016 (NE)^{-0.222}$

\* Todas las capas presentan ligamiento

CALCULAR

KENPAV - Esfuerzos y Deformaciones - v1.0d

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C. Asfáltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

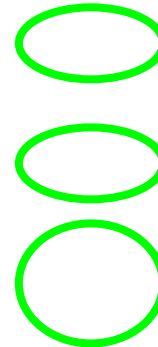
**GRÁFICA  $E_z$  (aplic. adm) Vs H (espesores, m)**

—  $E_{z,adm}$  —  $E_{z,apl}$

**Deformación Admisible**

UBICACIÓN: SUBRASANTE

$\epsilon_{z,adm} = 1279.36E-06$



KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C. Asfáltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

**Información Conocida**

CAPAS: 4  
 CAM: N  
 0.5 0.175E6

**Parámetros de Diseño Utilizados**

Radio de Contacto: 0.662  
 Presión de Contacto: 0.125  
 Distancia entre Ejes: 0.375  
 # Posiciones Eje: 3

**Información de la Estructura**

N°	Tipo	E (MPa)	μ	H (m)
1	CAPA ASFALTICA	5400	0.35	0.07
2	BASE GRANULAR	200	0.35	0
3	GRAVA NO TRATADA	100	0.35	0.18
4	SUB-RASANTE	50	0.35	

Diagrama de capas: TDS - C. G. Asfáltica, BASE GRANULAR, GRAVAS NO TRATADAS, SUBRASANTE

$\epsilon_{z,adm} = 0.016 (NE)^{-0.222}$

\* Todas las capas presentan ligamiento

CALCULAR

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

ESTRUCTURA DE TRAFICO BAJO (C. Asfáltica) - Iteración B.G

**Datos de Entrada** | Resultados y Gráfica

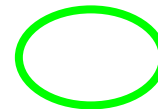
**GRÁFICA  $\epsilon_z$  (aplic. adm) Vs H (espesores, m)**

—  $\epsilon_{z,adm}$  —  $\epsilon_{z,apl}$

**Deformación Admisible**

UBICACIÓN: SUBRASANTE  
 $\epsilon_{z,adm} = 1279.36E-06$

**Deformación Aplicada**



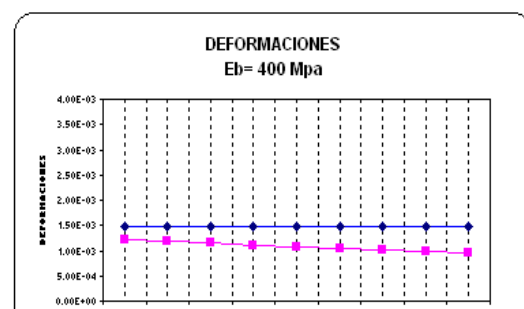
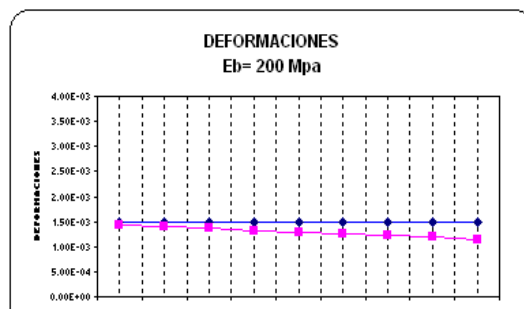
**2.5.4. DATOS Y RESULTADOS DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES**  
**2.5.4.1. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES**

<b>CBR</b>	10	En (%)
<b>MJA =</b>	36	Número de Veh. Pesados
<b>n =</b>	6	(años) Periodo de Diseño
<b>i =</b>	6,2	(%) Tasa de Crecimiento Anual
<b>Sub Base =</b>	0,25	Espesor de capa sub base en m.
<b>CAM =</b>	0,5	Coefficiente de Agresividad Media
<b>N =</b>	9,20E+04	(13 Tn) Tráfico Acumulado

Deformación Admisible Calculado:

1,47566E-03

Modulo de Elasticidad de las Capas			
datos	1	2	3
Ecr	5400	5400	5400
Eb	200	400	600
Esb	100	125	150
Esr	50	50	50
Rodadura	Deformaciones Aplicadas		
0,010	1,433E-03	1,231E-03	1,114E-03
0,015	1,392E-03	1,184E-03	1,066E-03
0,020	1,358E-03	1,146E-03	1,027E-03
0,025	1,326E-03	1,114E-03	9,950E-04
0,030	1,293E-03	1,084E-03	9,657E-04
0,035	1,260E-03	1,055E-03	9,384E-04
0,040	1,225E-03	1,026E-03	9,124E-04
0,045	1,188E-03	9,980E-04	8,871E-04
0,050	1,151E-03	9,699E-04	8,625E-04



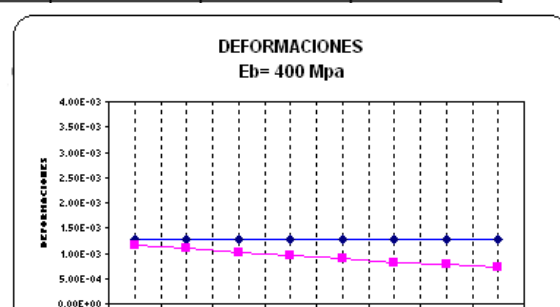
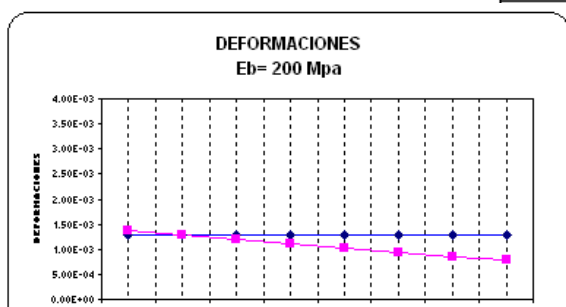
### 2.5.4.2. CARPETAS ASFÁLTICAS

CBR	10	En (%)
MJA =	36	Número de Veh. Pesados
n =	10	(años) Periodo de Diseño
i =	6,2	(%) Tasa de Crecimiento Anual
Sub Base =	0,18	Espesor de capa sub base en m.
CAM =	0,5	Coefficiente de Agresividad Media
N =	1,75E+05	(13 Tn) Tráfico Acumulado

Deformación Admisible Calculado:

1,27936E-03

Modulo de Elasticidad de las Capas			
datos	1	2	3
Ecr	5400	5400	5400
Eb	200	400	600
Esb	100	125	150
Esr	50	50	50
Rodadura	Deformaciones Aplicadas		
0,05	1,385E-03	1,161E-03	1,029E-03
0,06	1,286E-03	1,089E-03	9,679E-04
0,07	1,189E-03	1,019E-03	9,092E-04
0,08	1,097E-03	9,509E-04	8,529E-04
0,09	1,010E-03	8,864E-04	7,995E-04
0,10	9,310E-04	8,259E-04	7,492E-04
0,11	8,585E-04	7,696E-04	7,021E-04



## 2.5.5. PAVIMENTO RÍGIDO O HIDRÁULICO

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

Versión Demo

**CALCULO DEL TRAFICO**

Opciones

Calcular Tráfico 
$$N = 365 * MJA * \frac{(1+i)^n - 1}{i}$$

CAM y N

Variables

MVA: 68 Número de vehículos pesados

n: 20 (años) Periodo de diseño

i: 6.035 (%) Tasa de Crecimiento Anual

AM: 0.7 Coeficiente de Agresividad Media

N: 0.922E6 (10<sup>6</sup> Ton) Tráfico Acumulado

Borrar Datos Continuar....

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

Versión Demo

**ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO**

Datos de Entrada

Información Conocida

CAPAS: 3

CAM: 0.7

Num. Ejes: 9.22E+05

Parámetros de Diseño Utilizados

Radio de Contacto	Presión de Contacto	Distancia entre Ejes	# Posiciones Eje
0.125	0.662	0.375	3

Resultados y Gráfica



KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO

**Ecuaciones (Esfuerzos y Deformaciones)**

$$\sigma_{t,adm} = \sigma_6 \left( \frac{NE}{1 \times 10^6} \right)^b * K_c \cdot K_d \cdot K_r \cdot K_s$$

$$\epsilon_{z,adm} = 0.012(NE)^{-0.222}$$

**Ecuaciones (Kr, delta)**

$$K_r = 10^{-U \cdot b \cdot \delta}$$

$$\delta = \sqrt{(SN)^2 + \left( \frac{c \cdot Sh}{b} \right)^2}$$

**Estructura**

N°	Tipo	E (MPa)	v	H (m)
1	C.C	35000	0.25	0.15
2	Fund	24000	0.25	0
3	SUBR	22.5	0.35	

**Variables Calculadas**

Capa	Kc	Kr	δ	Ks
Losa de Concreto	1.5	0.837	1.05	1.0
Fundación	1.5	0.858	1.345	0.91

**Deformaciones Admisibles**

$\sigma_{t,C,C} = 1.816$  (MPa)  
 $\sigma_{t, Fun} = 1.886$  (MPa)  
 $\epsilon_{z, S.R} = 536.7E-06$  ( )

La estructura con los valores respectivamente mostrados por capa, seran con los cuales se calcularan los Esfuerzos Aplicadas.

CALCULAR

KENPAV - Esfuerzos y Deformaciones - v1.0d

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

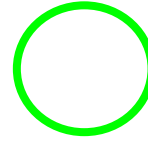
ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO

**GRÁFICA  $\sigma_t$  (aplic. adm) Vs H (espesores. m)**

— Sigma\_t,adm. — Sigma\_t,apl.

**Deformaciones Admisibles**

$\sigma_{t,C,C} = 1.816$  ( )  
 $\sigma_{t, Fun} = 1.886$  (MPa)



KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO

**Datos de Entrada**      **Calculos y Ecuaciones**      **Resultados y Gráfica**

**Información Conocida**

CAPAS: 3  
 CAM: 0.7  
 Num. Ejes: 9.22E+05

**Parámetros de Diseño Utilizados**

Radio de Contacto: 0.125      Presión de Contacto: 0.662      Distancia entre Ejes: 0.375      # Posiciones Eje: 3

**Estructura**

\* NL= Capa No Ligada

**Diseño**

La estructura presenta dos factores de riesgo, esto, con el fin de evitar que las fisuras se prolongen a la losa de concreto.

**Características de la Calzada**

Concreto en continuo  
 Con pasadores  
 Sin pasadores y no armadas

**Optimizar**

Espesor de la Fundación  
 Espesor del Concreto

**Datos Estructurales**

Capa	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_c$ (MPa)*	-1/b	SN	Sh(cm)	R (%)	H (m)
Concreto	35000	0.25	2.15	16	1.0	1.0	12.0	0.17
Fundación	24000	0.25	1.63 *	15	1.0	3.0	23.0	D
Subrasante	22.5	0.35	---	---	---	---	Tabla	---

KENPAV - Esfuerzos y Deformaciones - v1.0d      ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO      MAYÚS      NÚM

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

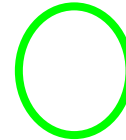
ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO

**Datos de Entrada**      **Calculos y Ecuaciones**      **Resultados y Gráfica**

**GRÁFICA Ot (aplic. adm) Vs H (espesores, m)**

**Deformaciones Admisibles**

$\sigma_{t, C, C} = 1.816$  ( )



KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

**ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO**

**Datos de Entrada**      **Calculos y Ecuaciones**      **Resultados y Gráfica**

**Información Conocida**

CAPAS: 3  
 CAM: 0.7  
 Num. Ejes: 9.22E+05

**Parámetros de Diseño Utilizados**

Radio de Contacto: 0.125      Presión de Contacto: 0.662      Distancia entre Ejes: 0.375      # Posiciones Eje: 3

**Estructura**

\* NL= Capa No Ligada

**Diseño**

La estructura presenta dos factores de riesgo, esto, con el fin de evitar que las fisuras se prolongen a la losa de concreto.

**Características de la Calzada**

- Concreto en continuo
- Con pasadores
- Sin pasadores y no armadas

**Optimizar**

- Espesor de la Fundación
- Espesor del Concreto

**Datos Estructurales**

Capa	E (MPa)	v	$\sigma_c$ (MPa)*	-1/b	SN	Sh(cm)	R (%)	H (m)
Concreto	35000	0.25	2.15	16	1.0	1.0	12.0	0.23
Fundación	24000	0.25	1.63 *	15	1.0	3.0	23.0	
Subrasante	22.5	0.35	----	---	---	---	Tabla	----

KENPAV - Esfuerzos y Deformaciones - v1.0d

ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO      MAYÚS      NÚM

Archivo Editar Diseño Ayuda

**ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO**

**Datos de Entrada**      **Calculos y Ecuaciones**      **Resultados y Gráfica**

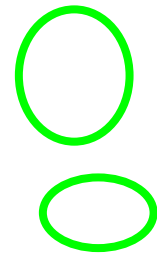
**GRÁFICA  $\sigma_t$  (aplic. adm) Vs H (espesores. m)**

— Sigma t.adm.      — Sigma t.asl.

**Deformaciones Admisibles**

$\sigma_{t, C.C} = 1.816$  ( )

$\sigma_{t, Fun} = 1.886$  (MPa)



KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO

**Datos de Entrada**      **Calculos y Ecuaciones**      **Resultados y Gráfica**

**Información Conocida**      **Parámetros de Diseño Utilizados**

CAPAS: 3      Radio de Contacto: 0.125      Presión de Contacto: 0.662      Distancia entre Ejes: 0.375      # Posiciones Eje: 3

CAM: 0.7

Num. Ejes: 9.22E+05

**Estructura**

\* NL= Capa No Ligada

**Diseño**

La estructura presenta dos factores de riesgo, esto, con el fin de evitar que las fisuras se prolongen a la losa de concreto.

**Características de la Calzada**

- Concreto en continuo
- Con pasadores
- Sin pasadores y no armadas

**Optimizar**

- Espesor de la Fundación
- Espesor del Concreto

**Datos Estructurales**

Capa	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_6$ (MPa)*	-1/b	SN	Sh(cm)	R (%)	H (m)
Concreto	35000	0.25	2.15	16	1.0	1.0	12.0	0.15
Fundación	24000	0.25	1.63	15	1.0	3.0	23.0	
Subrasante	50	0.35	----	---	---	----	Tabla	----

KENPAV - Esfuerzos y Deformaciones - v1.0d

ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO      MAYÚS      NÚM

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

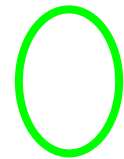
ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO

**Resultados y Gráfica**

GRÁFICA  $\sigma_t$  (aplic. adm) Vs H (espesores, m)

**Deformaciones Admisibles**

$\sigma_t, C.C = 1.816$  ( )



KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

Archivo Editar Diseño Ayuda

ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO

**Datos de Entrada**      **Calculos y Ecuaciones**      **Resultados y Gráfica**

**Información Conocida**

CAPAS: 3  
 CAM: 0.7  
 Num. Ejes: 9.22E+05

**Parámetros de Diseño Utilizados**

Radio de Contacto: 0.125      Presión de Contacto: 0.662      Distancia entre Ejes: 0.375      # Posiciones Eje: 3

**Estructura**

\*NL= Capa No Ligada

**Diseño**

La estructura presenta dos factores de riesgo, esto, con el fin de evitar que las fisuras se prolongen a la losa de concreto.

**Características de la Calzada**

Concreto en continuo  
 Con pasadores  
 Sin pasadores y no armadas

**Optimizar**

Espesor de la Fundación  
 Espesor del Concreto

**Datos Estructurales**

Capa	E (MPa)	v	$\sigma_6$ (MPa)*	-1/b	SN	Sh(cm)	R (%)	H (m)
Concreto	35000	0.25	2.15	16	1.0	1.0	12.0	0.21
Fundación	24000	0.25	1.63 *	15	1.0	3.0	23.0	0
Subrasante	50	0.35	----	---	---	---	[Tabla]	---

KENPAV - Esfuerzos y Deformaciones - v1.0d

KENPAV - DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Versión DEMO 1.0d

ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO

ESTRUCTURA CON CALZADA EN CONCRETO

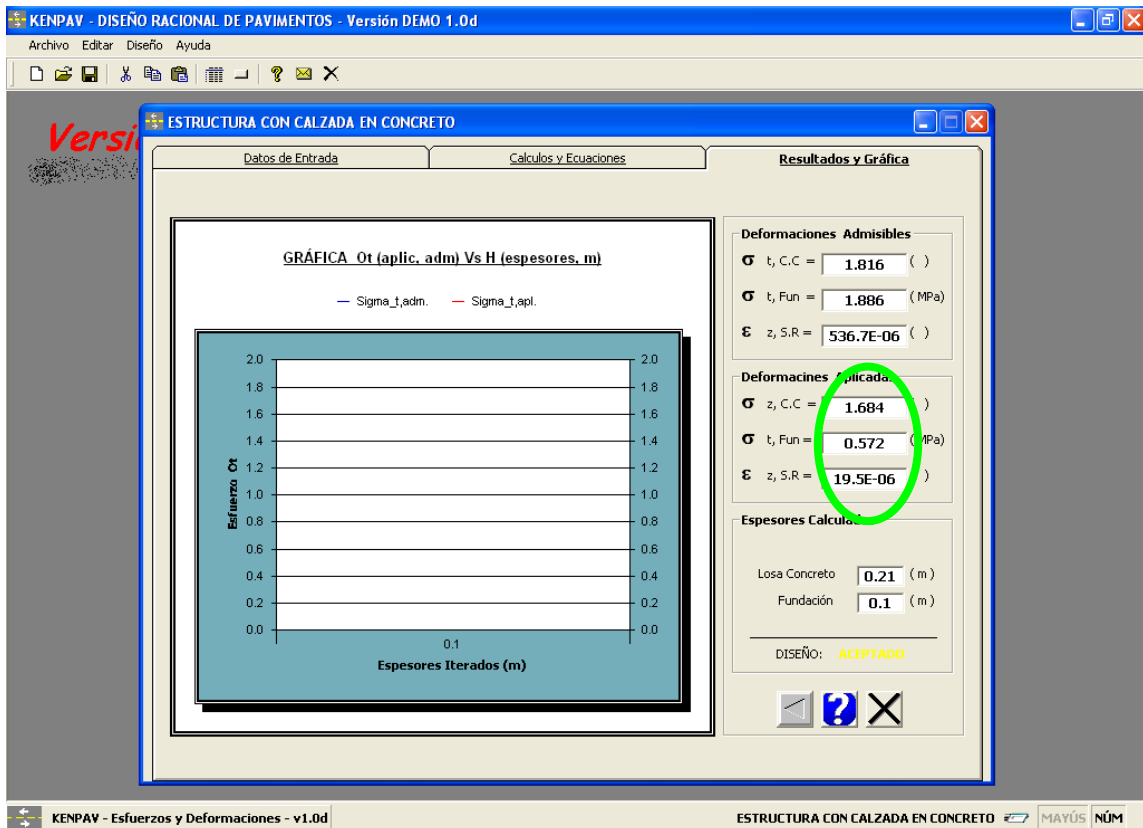
**Datos de Entrada**      **Calculos y Ecuaciones**      **Resultados y Gráfica**

**Ecuaciones (Esfuerzos y Deformaciones)**

$$\sigma_{t,adm} = \sigma_6 \left( \frac{NE}{1 + 1.0 \delta} \right)^b * K_c \cdot K_d \cdot K_r \cdot K_s$$

**Ecuaciones (Kr, delta)**

$$K_r = 10^{-U \cdot b \cdot \delta}$$

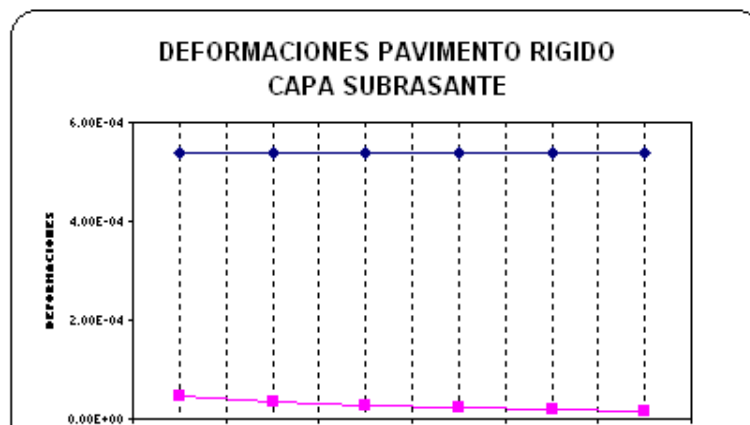
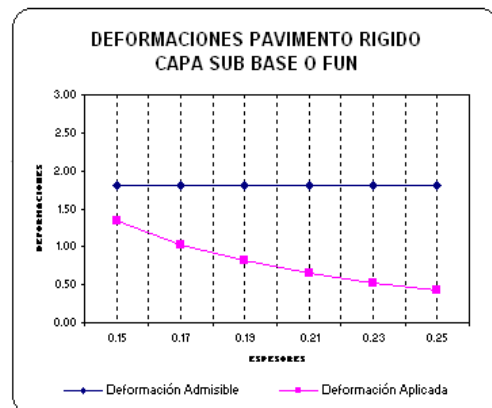
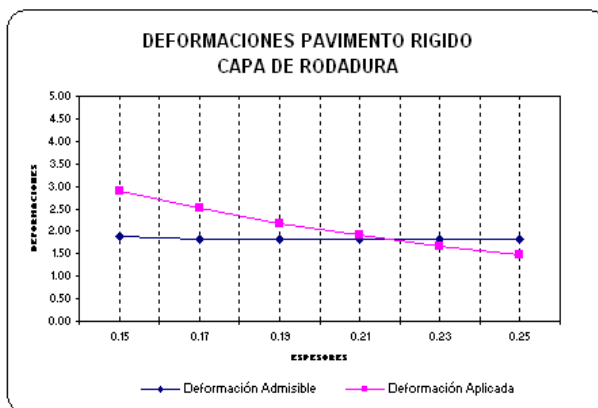


2.5.5.1. DATOS Y RESULTADOS DE LOS PAVIMENTOS RIGIDOS

TERRENO REGULAR  
CBR = 4.5 %

MJA =	68	Número de Veh. Pes.
n =	20	(años) Periodo de Diseño
i =	6.095	(%) Tasa de Crecimiento Anual
CAM =	0.7	Coefficiente de Agresividad Media
N =	9.22E+05	(13 Tn) Tráfico Acumulado

Modulo de Elasticidad de Cada Capa



TERRENO BUENO  
CBR = 10 %

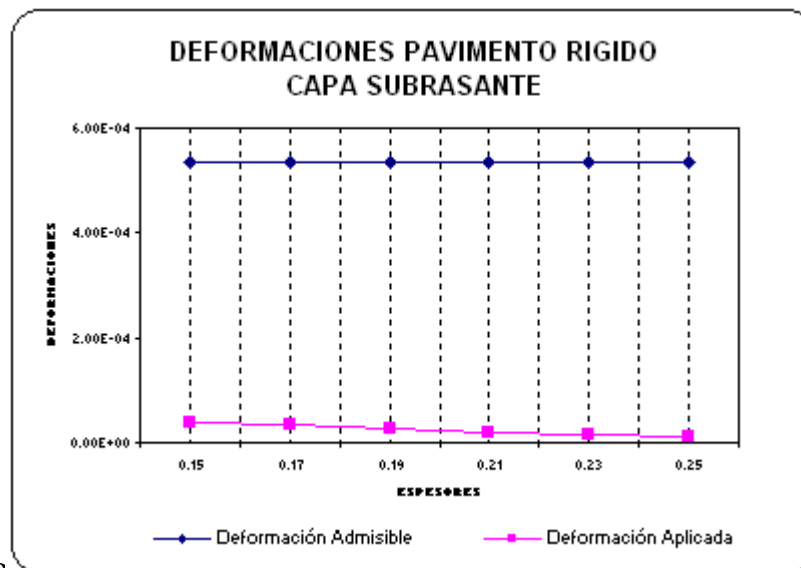
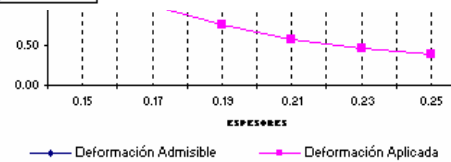
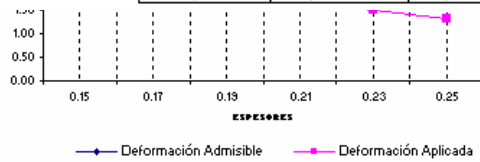
<b>MJA</b> =	68	Número de Veh. Pes.
<b>n</b> =	20	(años) Periodo de Diseño
<b>i</b> =	6.095	(%) Tasa de Crecimiento Anual
<b>CAM</b> =	0.7	Coefficiente de Agresividad Media
<b>N</b> =	9.22E+05	(13 Tn) Tráfico Acumulado

Modulo de Elasticidad de Cada Capa	
Concreto CR	35000 Mpa
Fundación	24000 Mpa
Subrasante	50

TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

CBR = 10 (%)		Modulo de Elasticidad de las Capas		
Deformación Admisible Calculado	datos	1	2	3
	Ecr	5400	5400	5400
	Eb	200	400	600
	Esb	100	125	150
	Esr	50	50	50
Rodadura	Deformaciones Aplicadas			
1,47566E-03	0,010	1,433E-03	1,231E-03	1,114E-03
1,47566E-03	0,015	1,392E-03	1,184E-03	1,066E-03
1,47566E-03	0,020	1,358E-03	1,146E-03	1,027E-03
1,47566E-03	0,025	1,326E-03	1,114E-03	9,950E-04
1,47566E-03	0,030	1,293E-03	1,084E-03	9,657E-04
1,47566E-03	0,035	1,260E-03	1,055E-03	9,384E-04
1,47566E-03	0,040	1,225E-03	1,026E-03	9,124E-04
1,47566E-03	0,045	1,188E-03	9,980E-04	8,871E-04
1,47566E-03	0,050	1,151E-03	9,699E-04	8,625E-04

Rodadura	Diferencia entre Deformación Admisible vs Deformación Aplicada			Diferencia entre Deformación Aplicada Posterior vs Anterior		
0,010	4,266E-05	2,447E-04	3,617E-04	4,100E-05	4,700E-05	4,800E-05
0,015	8,366E-05	2,917E-04	4,097E-04	3,400E-05	3,800E-05	3,900E-05
0,020	1,177E-04	3,297E-04	4,487E-04	3,200E-05	3,200E-05	3,200E-05
0,025	1,497E-04	3,617E-04	4,807E-04	3,300E-05	3,000E-05	2,930E-05
0,030	1,827E-04	3,917E-04	5,100E-04	3,300E-05	2,900E-05	2,730E-05
0,035	2,157E-04	4,207E-04	5,373E-04	3,500E-05	2,900E-05	2,600E-05
0,040	2,507E-04	4,497E-04	5,633E-04	3,700E-05	2,800E-05	2,530E-05
0,045	2,877E-04	4,777E-04	5,886E-04	3,700E-05	2,810E-05	2,460E-05
0,050	3,247E-04	5,058E-04	6,132E-04			



2.6. VALORACIONES DE LOS RESULTADOS

## CARPETAS ASFALTICAS

CBR = 10 (%)		Modulo de Elasticidad de las Capas				
Deformación Admisible Calculado	datos	1	2	3		
	Ecr	5400	5400	5400		
	Eb	200	400	600		
	Esb	100	125	150		
	Esr	50	50	50		
	Rodadura	Deformaciones Aplicadas				
1,27936E-03	0,05	1,385E-03	1,161E-03	1,029E-03		
1,27936E-03	0,06	1,286E-03	1,089E-03	9,679E-04		
1,27936E-03	0,07	1,189E-03	1,019E-03	9,092E-04		
1,27936E-03	0,08	1,097E-03	9,509E-04	8,529E-04		
1,27936E-03	0,09	1,010E-03	8,864E-04	7,995E-04		
1,27936E-03	0,10	9,310E-04	8,259E-04	7,492E-04		
1,27936E-03	0,11	8,585E-04	7,696E-04	7,021E-04		
1,27936E-03	0,12	7,928E-04	7,176E-04	6,582E-04		
Rodadura	Diferencia entre Deformación Admisible vs Deformación Aplicada			Diferencia entre Deformación Aplicada Posterior vs Anterior		
0,05	-1,056E-04	1,184E-04	2,504E-04	9,900E-05	7,200E-05	6,110E-05
0,06	-6,640E-06	1,904E-04	3,115E-04	9,700E-05	7,000E-05	5,870E-05
0,07	9,036E-05	2,604E-04	3,702E-04	9,200E-05	6,810E-05	5,630E-05
0,08	1,824E-04	3,285E-04	4,265E-04	8,700E-05	6,450E-05	5,340E-05
0,09	2,694E-04	3,930E-04	4,799E-04	7,900E-05	6,050E-05	5,030E-05
0,10	3,484E-04	4,535E-04	5,302E-04	7,250E-05	5,630E-05	4,710E-05
0,11	4,209E-04	5,098E-04	5,773E-04	6,570E-05	5,200E-05	4,390E-05
0,12	4,866E-04	5,618E-04	6,212E-04			

## 2.6.1. PAVIMENTOS FLEXIBLES

**Variación de la capa de rodadura**, en los resultados se puede observar al realizar la variación de los espesores de la capa de rodadura las deformaciones aplicadas calculadas en la subrasante decrecen, es decir a mayor espesor de rodadura menor deformación en la subrasante como se muestra a continuación:

**Tratamientos superficiales**, para un periodo de diseño  $n=6$  tenemos, para una rodadura de 0,010 m. una  $\varepsilon_{Z,Ap}=1,433E-03$  y para una rodadura de 0,050 m. una  $\varepsilon_{Z,Ap} = 1.151E-03$

**Carpetas asfálticas**, para un periodo de diseño  $n=10$  tenemos, para una rodadura de 0,050 m. una  $\varepsilon_{Z,Ap} = 1,385E-03$  y para una rodadura de 0,012 m.  $\varepsilon_{Z,Ap} = 7,928E-04$ , también podemos observar la deformación varía cuando se cambia el periodo de diseño.

**Variación de los módulos**, en los resultados se puede observar que al realizar la variación de módulos de la base y sub-base las deformaciones aplicadas calculadas varían en la subrasante como se muestra a continuación: para una rodadura de 0,050 m. tenemos:

Tratamientos superficiales

Eb	200	400	600
Esb	100	125	150
Rodadura	Deformaciones Aplicadas( $\varepsilon_{Z,Ap}$ )		
0,050	1,151E-03	9,699E-04	8,625E-04

Capeta asfáltica

Eb	200	400	600
Esb	100	125	150
Rodadura	Deformaciones Aplicadas( $\varepsilon_{Z,Ap}$ )		
0,050	1,385E-03	1,161E-03	1,029E-03

Valorando los resultados podemos decir que la variación de la capa de rodadura, tiene incidencia en la deformación de los pavimentos a mayor espesor menor deformación en la subrasante. Por otro lado también queda demostrado que la variación del modulo de las capas granulares tiene mayor incidencia en la deformación en la subrasante, por ende en todo el pavimento flexible.

Finalmente podemos decir, para reducir las deformaciones en los pavimentos flexibles es aumentar o mejorar el módulo que es un parámetro representativo de la capacidad de soporte del suelo de fundación del camino, desde luego también los módulos de las capas granulares y capa de rodadura, que el aumento de los espesores de la capas granulares y rodadura.

## 2.6.2. PAVIMENTOS RÍGIDOS

TERRENO REGULAR  
CBR = 4,5 %

### PAVIMENTO RIGIDO

Modulo de Elasticidad de Cada Capa			
Concreto CR	35000 Mpa		
Fundación	24000 Mpa		
Subrasante	22,5		
Deformación Admisible :	$\sigma_{t,Cc}$	$\sigma_{t,Fun}$	$\epsilon_{z,SR}$
	1,816	1,886	5,367E-04
Espesores	Deformaciones Aplicadas		
0,15	2,888	1,333	4,520E-05
0,17	2,504	1,032	3,500E-05
0,19	2,179	0,813	2,750E-05
0,21	1,907	0,651	2,200E-05
0,23	1,680	0,530	1,790E-05
0,25	1,488	0,437	1,470E-05
Espesores	Diferencia entre Deformación Admisible vs Deformación Aplicada		
0,15	-1,072	0,553	4,915E-04
0,17	-0,688	0,854	5,017E-04
0,19	-0,363	1,073	5,092E-04
0,21	-0,091	1,235	5,147E-04
0,23	0,136	1,356	5,188E-04
0,25	0,328	1,449	5,220E-04
Espesores	Diferencia entre Deformación Aplicada Posterior vs Anterior		
0,15	0,384	0,301	1,020E-05
0,17	0,325	0,219	7,500E-06
0,19	0,272	0,162	5,500E-06
0,21	0,227	0,121	4,100E-06
0,23	0,192	0,093	3,200E-06
0,25			

TERRENO BUENO  
CBR = 10 %

PAVIMENTO RIGIDO

Modulo de Elasticidad de Cada Capa			
Concreto CR	35000 Mpa		
Fundación	24000 Mpa		
Subrasante	50		
Deformación Admisible :	$\sigma_{t,Cc}$	$\sigma_{t,Fun}$	$\epsilon_{z,SR}$
	1,816	1,886	5,367E-04
Esesores	Deformaciones Aplicadas		
0,15	2,508	1,150	3,950E-05
0,17	2,038	0,988	3,350E-05
0,19	1,866	0,757	2,580E-05
0,21	1,684	0,572	1,950E-05
0,23	1,489	0,467	1,590E-05
0,25	1,324	0,386	1,320E-05
Esesores	Diferencia entre Deformación Admisible vs Deformación Aplicada		
0,15	-0,692	0,736	4,972E-04
0,17	-0,222	0,898	5,032E-04
0,19	-0,050	1,129	5,109E-04
0,21	0,132	1,314	5,172E-04
0,23	0,327	1,419	5,208E-04
0,25	0,492	1,500	5,235E-04
Esesores	Diferencia entre Deformación Aplicada Posterior vs Anterior		
0,15	0,470	0,162	6,000E-06
0,17	0,172	0,231	7,700E-06
0,19	0,182	0,185	6,300E-06
0,21	0,195	0,105	3,600E-06
0,23	0,165	0,081	2,700E-06
0,25			

En los pavimentos rígidos se calculan tres deformaciones admisibles, uno es el esfuerzo de tracción admisible en la base de la capa de concreto ( $\sigma_{t,Cc}$ ), esfuerzo de tracción admisible en la base de la capa de fundación ( $\sigma_{t,Fun}$ ) y por último la deformación admisible en la superficie de la subrasante ( $\epsilon_{z,SR}$ ), valorando los resultados se puede observar que al realizar la variación de la capa de rodadura (capa de concreto), las deformaciones aplicadas calculadas varían, es decir a mayor espesor de la capa de concreto o losa menor deformación en cada capa. También se puede ver en los resultados que al mejorar, el CBR por ende el módulo de la subrasante (de

terreno regular a bueno) las deformaciones son menores, finalmente en los resultados se puede observar que la deformaciones calculadas en la subrasante de los pavimentos rígidos son menores que las calculadas en los pavimentos flexibles, quedando demostrado que sufren menores deformaciones.

El proceso iterativo del programa KENPAV, muestra la influencia de la carga, espesores y tipos de subrasantes tanto en pavimentos flexibles como en rígidos, y los resultados son muy importantes ya que nos muestran diferentes deformaciones en cada tipo de rodadura, y queda demostrado que a menor calidad de material, se requiere mayor espesor de la capa que compone.

Haciendo una comparación entre los resultados obtenidos de las deformaciones se puede decir que en el caso de pavimentos flexibles se producen grandes deformaciones, mientras que en el pavimento rígido estas deformaciones son pequeñas.