

DISEÑO DIRECTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Ing. Henry A. Vergara B.- ECI

Especialista en Diseño, Construcción y Conservación de Vías.- ECI

RESUMEN

En el cálculo de una estructura de pavimento se determinan el tipo y la calidad de los materiales que la componen. Estos parámetros los establece previamente el ingeniero con una serie de criterios entre los que se pueden mencionar los técnicos, económicos y los del estado del arte; los materiales constituyentes del pavimento se caracterizan por su espesor (h), el módulo de elasticidad (E) y la relación de Poisson (μ). Para conocer el estado de esfuerzos y deformaciones (σ_z , ϵ_z , ϵ_t) del pavimento se aplica la teoría multicapa elástica desarrollada por inicialmente por Burmister.

I. INTRODUCCION

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 enfrentaran a un reto muy importante que es el de proporcionar estructuras de pavimentos eficaces con presupuestos cada vez mas restringidos.

Dentro del contexto del diseño de pavimentos se acepta que el dimensionamiento de estas estructuras permite que se establezcan las 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.

El método que se describe en este documento 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 esta sometida la estructura (tránsito). El procedimiento seguido para el diseño de un pavimento por métodos racionales se planteo inicialmente por

medio de modelos bicapas que posteriormente fueron generalizados a tricapas y multicapa.

II. MODELACION MECANICISTA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

Existen en general dos clases de estructuras de pavimento, los flexibles y los rígidos; la principal diferencia entre estos es la forma como reparten las cargas. Desde el punto de vista de diseño, los pavimentos flexibles están formados por una serie de capas y la distribución de la carga está determinada por las características propias del sistema de capas. Los rígidos tienen un gran módulo de elasticidad y distribuyen las cargas sobre una área grande, la consideración más importante es la resistencia estructural del concreto hidráulico.

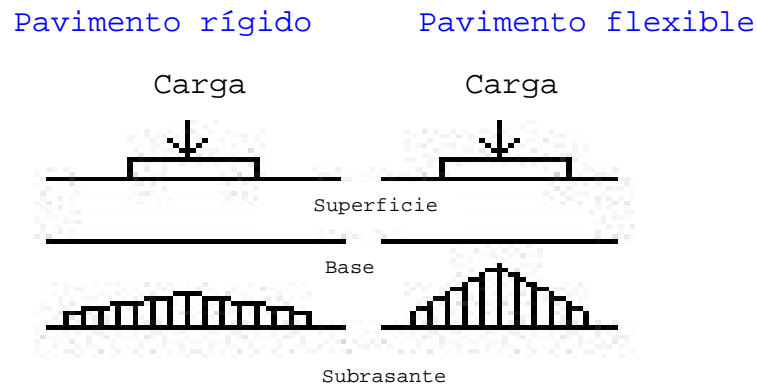


Figura 1. Distribución de carga característica de un Pavimento rígido versus uno flexible

Una buena forma de caracterizar el comportamiento de un pavimento flexible bajo la acción de cargas de ruedas, es considerarlo como un semiespacio homogéneo; este tiene una 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 una 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 q 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.

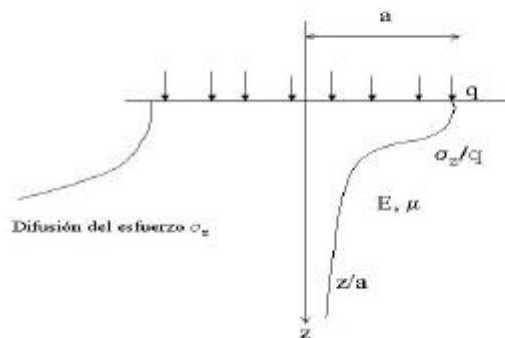


Figura 2. Modelo de Boussinesq¹

La modelación de la solución inicial basada en la teoría de Boussinesq se muestra en la **figura 2**. La ecuación general para determinar la distribución de esfuerzos de es la siguiente:

¹ REYES, Fredy L. "Diseño de pavimentos por métodos racionales". Tomo I. Universidad de Los Andes. Bogotá 1999.

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

Donde,

σ_z : es el esfuerzo vertical a cualquier profundidad.

q: 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).

III. 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 esta 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 esta 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 transito, 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 (μ).
- El espesor de la capa (h).

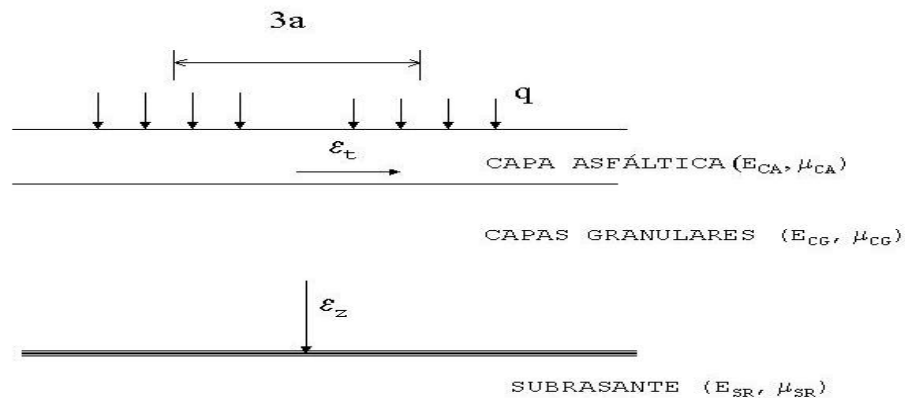


Figura 3. Estructura multicapa de un pavimento flexible.

En la **figura 3** 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:

- Ensayos de laboratorio combinados con ensayos no destructivos.
- Estimación o uso de nomogramas con correlaciones estadísticas.
- Comparación con materiales "estándar" de características similares.

- 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 estos 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 maneras²:

- Que la deformación horizontal por tracción ϵ_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 ϵ_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 producirá ahuellamiento. Además se puede verificar que σ_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

$$\epsilon_t = k N^{-a}$$

² LILLI, Félix J. "Curso sobre diseño racional de Pavimentos". Popayán Septiembre de 1987.

En donde:

ϵ_t = Deformación unitaria por tracción en la fibra inferior de la capa de material asfáltico.

N = Numero admisible de repeticiones de carga.

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

- Para la Subrasante

$$\epsilon_z = k N^{-b}$$

En donde:

ϵ_z = Deformación unitaria vertical en la capa superior de la subrasante.

N = Numero 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 critica, esta según los franceses (LCPC)³ es:

$$\sigma_{adm} = a (N/10^6)^{-1/12} \sigma_0$$

En donde:

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

N = Numero admisible de repeticiones de carga.

a = Parámetros que dependen del tipo de material.

σ_0 = Resistencia a la flexotracción del material.

³ MEDINA, Luis R. y otros. " COMPROBACION ESTRUCTURAL DE LAS SECCIONES DE PAVIMENTO DE LA INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS 6.1 y 6.2 I.C.". AEPO S.A. España 2000.

IV. DISEÑO DIRECTO DEL PAVIMENTO

El procedimiento de diseño consiste en escoger una adecuada combinación de espesores de capas y características de materiales (E, μ, h) para que los esfuerzos y deformaciones (σ_z, ϵ_z y ϵ_t) causados por las sollicitaciones a que se somete la estructura, permanezcan dentro de los límites admisibles durante la vida útil de la estructura que están constituyendo.

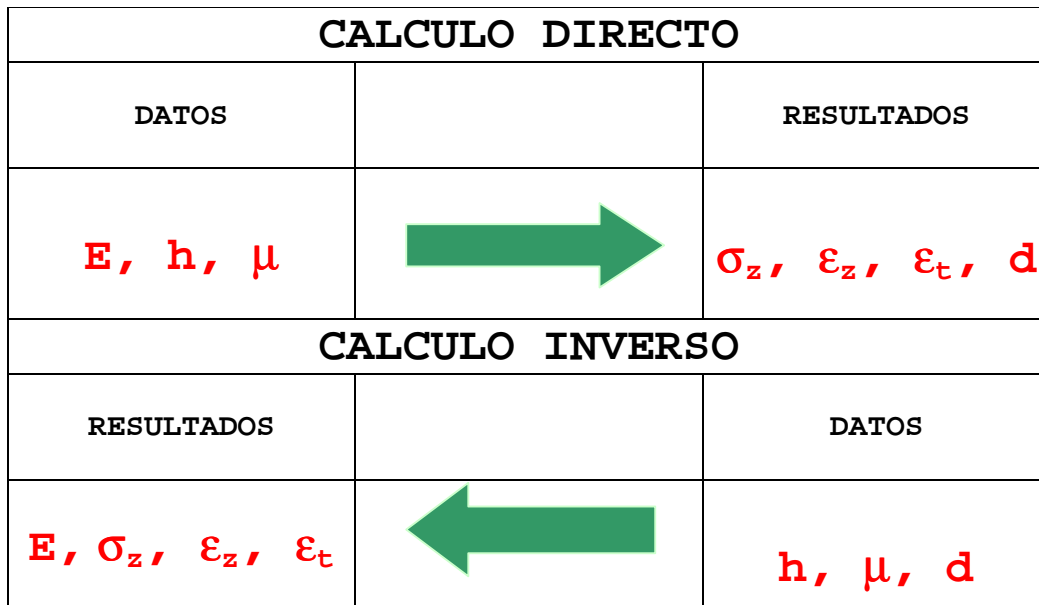
En términos generales, con las leyes de fatiga de los materiales se puede encontrar las deformaciones, esfuerzos y deflexiones admisibles de los materiales y con la teoría de esfuerzo y deformación en una masa de suelo se encuentran las deformaciones, esfuerzos y deflexiones actuantes en la estructura 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 esta 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, FLAC3D 2.00 (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.

Con los valores de los módulos y espesores de las capas y empleando programas de computador que determinan las tensiones, deformaciones y desplazamientos se comprueba si la estructura del pavimento esta bien dimensionada con las suposiciones hechas inicialmente, esto se denomina **cálculo directo**⁴; la solución a la que se llega de esta manera es única. Cuando hay que estimar la capacidad estructural de un pavimento en servicio que esta 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

⁴MEDINA, Luis R. y otros. "NOCIONES BASICAS DE CALCULO INVERSO DE FIRMES". AEPO S.A. España 2000.

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 calculo inverso también existen programas de computador como el EVERCAL 5.0, MODULUS 5.1, que hacen las iteraciones necesarias automáticamente y no manual mente como se ha hecho hasta la actualidad en nuestro medio. En el siguiente esquema se muestra el proceso del cálculo directo e inverso.



Según AEPO S.A. Madrid España 2001.

A continuación se presentan algunas ecuaciones y conceptos encontrados en las referencias para determinar los límites admisibles en cada capa que conforma la estructura de pavimento.

➤ **SUBRASANTE**

Para determinar las características del suelo de soporte se puede recurrir a ensayos de placa o a través de ensayos triaxiales, el módulo de la subrasante es susceptible a la humedad y al estado de esfuerzos de la mismas. Las siguientes correlaciones se pueden emplear para determinar este parámetro, basados en el ensayo CBR, que es de relativamente fácil ejecución, mientras que los mencionados primero son costosos.

⁴MEDINA, Luis R. y otros. "NOCIONES BASICAS DE CALCULO INVERSO DE FIRMES". AEPO S.A. España 2000.

$$E_{SR} = 100 \text{ CBR} \quad (\text{Kg/cm}^2)$$

$$E_{SR} = 130 \text{ CBR}^{0.714} \quad (\text{Kg/cm}^2)$$

$$E_{SR} = 10 \text{ CBR} \quad (\text{MPa})$$

Para suelos blandos con CBR < 10%

$$E_{SR} = 6.5 \text{ CBR}^{0.65} \quad (\text{MPa})$$

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

La relación de Poisson se puede tomar: $0.35 < \mu < 0.50$

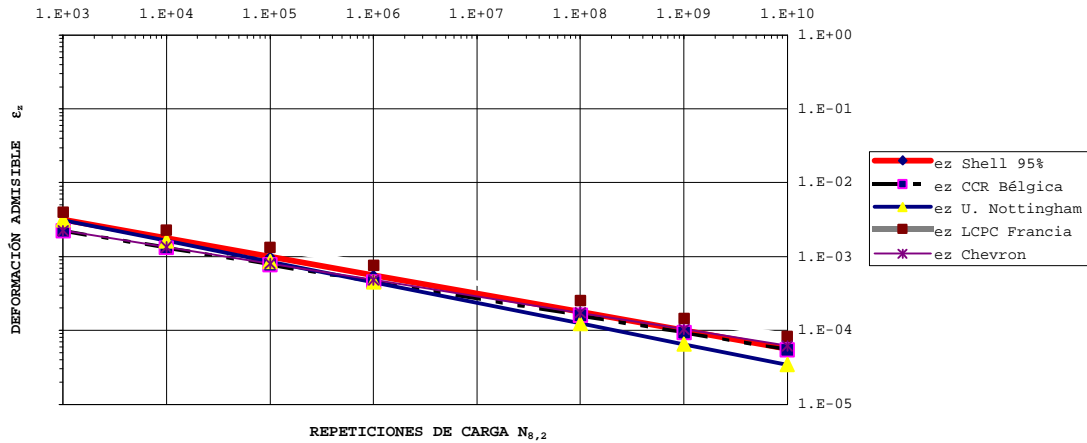
Los límites admisibles se pueden obtener con las ecuaciones que se muestran en las siguientes tablas.

ECUACIÓN DE ESFUERZO	UNIDAD	OBSERVACIONES
$\sigma_z = C E_{SR} / 1 + 0.7 \text{LOG}_{10}(N)$	(Kg/cm ²)	C = 0.008 (JEUFFROY). C = 0.007 (Dormon & Kerhoven). C = 0.006 (ACUM & FOX)
$\sigma_z = 0.09607 \text{ CBR}^{1.2} (N)^{1/4.35}$	MPa	Centro de investigaciones viales de Bélgica (CRR), CBR en %

ECUACIÓN DE ELONGACIÓN	OBSERVACIONES
$\epsilon_z = 2.8 \times 10^{-2} (N)^{-0.25}$	Shell, confiabilidad 50% **
$\epsilon_z = 2.13 \times 10^{-2} (N)^{-0.25}$	Shell, confiabilidad 85%
$\epsilon_z = 1.79 \times 10^{-2} (N)^{-0.25}$	Shell, confiabilidad 95%
$\epsilon_z = 2.16 \times 10^{-2} (N)^{-0.28}$	Universidad de Nottingham. Brown y Pell.
$\epsilon_z = 2.1 \times 10^{-2} (N)^{-0.24}$	LCPC Francia, para calzadas nuevas.
$\epsilon_z = 2.5 \times 10^{-2} (N)^{-1/4.1}$	LCPC Francia, Para refuerzos.
$\epsilon_z = 1.1 \times 10^{-2} (N)^{-0.23}$	Centro de investigaciones viales de Bélgica (CRR).
$\epsilon_z = 1.05 \times 10^{-2} (N)^{-0.223}$	Chevron.

** Utilizar una confiabilidad del 85% equivale a emplear la del 50% aplicando 3 veces las repeticiones de carga (N) esperadas. Del mismo modo al utilizar la del 95% de confiabilidad equivale a emplear la del 50% aplicando 6 veces las repeticiones esperadas.

**DEFORMACIONES VERTICALES ESPECIFICAS DE COMPRESIÓN
SOBRE LA SUBRASANTE**



➤ **MATERIALES GRANULARES**

Para determinar las características de los materiales granulares se puede usar el criterio de fijar el modulo de una capa en función del modulo de la capa subyacente, y del espesor de la capa en mm, ecuación propuesta por Dormon & Metcalf, y adoptada por la Shell en su método de diseño⁵.

$$E_{CG} = 0.206 h_{CG}^{0.45} E_{SR} \quad (\text{Kg/cm}^2)$$

$$2 < E_{CG}/E_{SR} < 4$$

h en mm.

También se pueden utilizar las siguientes ecuaciones⁶ teniendo en cuenta las algunas recomendaciones:

$$E_{SB} = E_{SR}(5.35 \log h_{SB} + 0.62 \log E_{SR} - 1.56 \log h_{SB} \log E_{SR} - 1.13)$$

$$E_B = E_{SB}(8.05 \log h_B + 0.84 \log E_{SB} - 2.10 \log h_B \log E_{SB} - 2.21)$$

En donde:

E_{SR} : Es el módulo de elasticidad de la subrasante en Kg/cm².

⁵ SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. "Addendum to the Shell pavement design manual". London 1985.

⁶ VASQUES VARELA, LUIS RICARDO. "Método empírico -mecanicista de diseño de pavimentos flexibles".-----, Manizales. 2002.

h_{SB} : Es el espesor de la capa de subbase en cm.
 E_{SB} : Es el módulo de elasticidad de la subbase en Kg/cm².
 h_B : Es el espesor de la capa de base en cm.
 E_B : Es el módulo de elasticidad de la base en Kg/cm².

Se recomienda dividir las capas en capas menores aproximadamente iguales cuando su espesor es mayor de 20 cm.

La relación de Poisson se puede tomar como: $0.35 < \mu < 0.50$

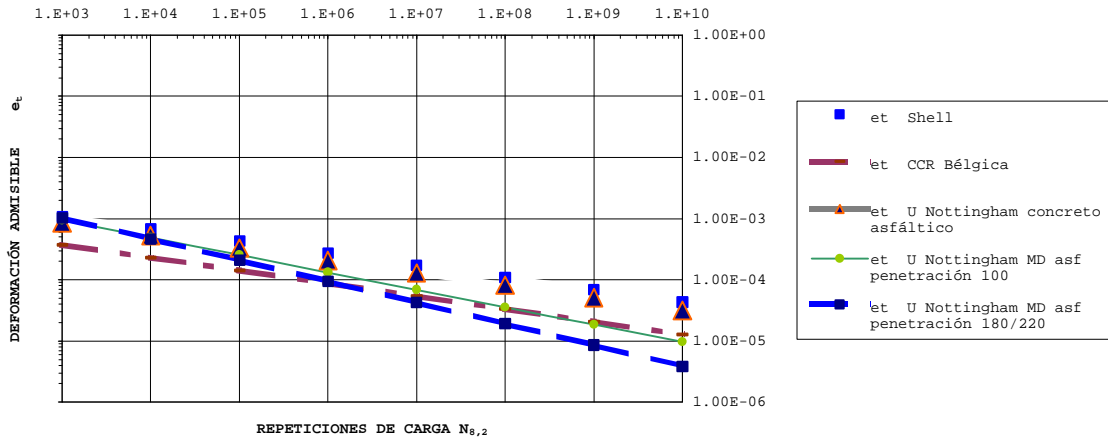
➤ CAPAS EN MATERIAL ASFÁLTICO

Si no se disponen de los ensayos de laboratorio para determinar el módulo de la mezcla asfáltica, éste se puede estimar a partir de la composición volumétrica de ésta y del módulo del asfalto empleado usando el ábaco de Van Der Pole; la relación de Poisson varia con la temperatura, pero se puede tomar $\mu = 0.35$.

Los límites admisibles se pueden obtener con las ecuaciones que reporta la bibliografía reunidas en la siguiente tabla.

ECUACIÓN DE ELONGACIÓN	OBSERVACIONES
$\epsilon_t = 3.48 \times 10^{-3} (N)^{-0.204}$	Universidad de Nottingham ⁺⁺ , Hot Rolled.
$\epsilon_t = 6.81 \times 10^{-3} (N)^{-0.285}$	⁺⁺ Mezclas densas con asfalto de penetración 100.
$\epsilon_t = 11.38 \times 10^{-3} (N)^{-0.347}$	⁺⁺ Con asfalto 180/220.
$\epsilon_t = 1,6 \times 10^{-3} (N)^{-0.21}$	Centro de investigaciones viales de Bélgica (CRR).
$\epsilon_t = (0.856V_b + 1.08) S_{mix}^{-0.36} (N)^{-0.2}$	Shell. V_b = % de contenido de asfalto de la mezcla, S_{mix} = Modulo de la mezcla en Pa.
$\epsilon_t = 6.44 \times 10^{-3} (N)^{-0.27}$	CEDEX-COST324 España 1998.
$\epsilon_t = 2.522 \times 10^{-3} (N)^{-0.20}$	Shell-CEDEX España 1986.
$\epsilon_t = 2.852 \times 10^{-3} (N)^{-0.20}$	Shell-ESPAS España 1990.

DEFORMACIONES HORIZONTALES POR FLEXOTRACCIÓN EN LAS CAPAS ASFÁLTICAS



Se puede llegar con el cálculo directo a un diseño óptimo, usando el criterio y la experiencia de ingeniero de carreteras lo que conduce a que se escoja una adecuada combinación de espesores y materiales que cumplan con las leyes de la fatiga (esfuerzos, deformaciones y deflexiones). Sin embargo se obtienen resultados muy variados según la ley escogida, lo que nos llevaría a pensar que las leyes de fatiga de los materiales se convertiría en un parámetro de diseño; para que esto no suceda se debe hacer más investigación en este campo de la ingeniería y no solamente convertir en "recetas de cocina" los estudios desarrollados en otros países donde existes otras condiciones climáticas, las cargas de los vehículos son diferentes y los materiales tienen propiedades mecánicas distintas, entre otras consideraciones.

BIBLIOGRAFÍA

- BERRY, Peter L. y REID, David. "Mecánica de suelos", McGraw Hill. Bogotá 1993.
- CRESPO, del Río Ramón " LA INGENIERIA DE PAVIMENTOS EN EL SIGLO XXI". AEPO S.A. España 2002.
- DEPARTMENT OF THE ARMY AND THE AIR FORCE. "Pavement desing for road, streets, and open storage areas, elastic layered method". USA October 1994.
- HUANG, Yang H. "Pavement analysis and design", Prentice Hall. United States of America, 1993.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, "Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras", Bogotá D.C., marzo, 2002.
- LILLI, Félix J. "Curso sobre diseño racional de Pavimentos". Popayán Septiembre de 1987.
- MEDINA, Luis R. y otros. " CALCULO DE LEYES DE FATIGA DE MEZCLAS BITUMINOSAS". AEPO S.A. España 2001.
- MEDINA, Luis R. y otros. " COMPROBACION ESTRUCTURAL DE LAS SECCIONES DE PAVIMENTO DE LA INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS 6.1 y 6.2 I.C.". AEPO S.A. España 2000.
- MONTEJO, Alfonso. "Ingeniería de pavimentos para carreteras". Universidad Católica de Colombia. Bogotá 2001.
- OLIVERA, Fernando B. "Estructuración de las vías terrestres". CECSA. México 1996. (Segunda Edición).
- REYES, Fredy L. "Diseño de pavimentos por métodos racionales". Tomo I. Universidad de Los Andes. Bogotá 1999.
- SABOGAL, Fernando S. "Pavimentos". Tomo I, Universidad La Gran Colombia. Bogotá 1992.
- SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. "Addendum to the Shell pavement design manual". London 1985.
- SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. "Shell pavement design manual". London 1978.
- VASQUES VARELA, LUIS RICARDO. "Funciones de transferencia en el método empírico - mecanicístico de diseño de pavimentos flexibles".----- Manizales 2002.
- VASQUES VARELA, LUIS RICARDO. "Método empírico - mecanicístico de diseño de pavimentos flexibles".----- -. Manizales 2002.
- WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, "WSDOT pavement guide", July 1998.
- YODER, E. J. y WITCZAK, M. W. " PRINCIPLES OF PAVEMENT DESING". Second edition. Jhon Wiley & Sons, Inc. 1975.