

## Diseño estructural de pavimento flexible

**Juan Patillo B.**

Ingeniero Civil, Universidad de Chile, El Vaticano 3948, Depto 82, Las Condes, Santiago, Chile.

**RESUMEN:** Hoy día de acuerdo a nuestra realidad hay variadas áreas dentro del conocimiento de los pavimentos asfálticos que se deberían revisar. Así se tiene, por ejemplo:

- Diseño estructural de pavimentos asfálticos
- Diseño de tratamiento superficial
- Especificaciones técnicas de construcción
- Métodos constructivos, etc.

Debido a lo extenso que sería efectuar un análisis somero de los temas enumerados se ha seleccionado sólo el Área de Diseño estructural para el presente trabajo, por cuanto es en esta temática donde se ha producido un cambio radical en estos últimos 10 años. El progreso que ha registrado este campo durante este último decenio hace aconsejable una revisión del "Estado del Arte" relativo a todos los aspectos involucrados en el diseño estructural. A continuación se analiza su importancia y se puntualizan algunos aspectos que a juicio del autor, se hace indispensable adoptar.

Finalmente se presenta un método de diseño, actualmente utilizado en Nueva Zelanda, por considerarlo el método que refleja en mejor forma nuestra problemática caminera.

### I. IMPORTANCIA DEL DISEÑO ESTRUCTURAL

El usuario aprecia la calidad y condición de servicio de una carretera de acuerdo a su estado superficial, seguridad de tránsito y economía en su operación. Todos estos factores han sido resumidos en un índice llamado "índice de Servicio o de Serviciabilidad" (según la "pista de prueba" de la AASHTO).

Este índice de Servicio (I.S.) mide las irregularidades superficiales, deterioro, grietas, ahuellamiento, etc.; defectos que dependen en forma relevante de la estructura del pavimento. La variación del óptimo I.S. hasta el valor más bajo tolerable por el usuario determina la vida útil del pavimento. Es así que una estructuración insuficiente acortará esta vida útil. Por otra parte, los diseños se proyectan para una duración de su estructura llamada horizonte o vida de diseño. Esta condición tampoco será cumplida en la realidad, si el diseño no representa en forma adecuada su entorno y parámetros solicitantes. Esta situación quedará reflejada en una diferencia entre la vida útil y el tiempo de duración estimado en el proyecto.

Al producirse un acortamiento de la vida útil, se habrá perdido a su vez los resultados obtenidos de los estudios de prefactibilidad y de priorización de la inversión que fueron determinados sobre la base de un diseño poco acertado.

Analizada la importancia del diseño estructural desde otro punto de vista, se recuerda que el costo total de una carretera es:

$$C_T = C_{\text{constr.}} + C_{\text{mant.}} + C_{\text{oper.}} \pm V_r$$

Donde:

|                      |   |
|----------------------|---|
| $C_t$                | = Costo Total   |
| $C_{\text{constr.}}$ | = Costo de Construcción                                   |
| $C_{\text{mant.}}$   | = Costo de Conservación                                   |
| $C_{\text{oper.}}$   | = Costo de Operación                                      |
| $V_r$                | = Valor residual de la carretera después de la vida útil. |

Se considera que el Costo de Operación es el 80% aproximadamente del total; a su vez el de Construcción con su mantención asociada es de un 10% y finalmente el Valor Residual utilizable es otro 10%. Estos porcentajes dependen del desarrollo del país. Así se tiene que en países desarrollados los valores de construcción y mantención no superan el 6% del costo total.

Esto significa que la construcción con un diseño poco eficiente, cuyo valor no es más allá de un 10% del total, habrá ocasionado un cuantioso daño a la economía nacional representada mayoritariamente por la pérdida en el Costo de Operación.

Lo antes expuesto da una clara indicación de la importancia que tiene la selección de una metodología de diseño acertada. La excelencia obtenida, resultante de una buena metodología, quedará de manifiesto cuando la vida útil de la carretera sea similar a la proyectada. Actualmente, en algún porcentaje de nuestros caminos se presenta una dispersión de estos dos valores, motivo por el cual se hace necesario una revisión de las metodologías de diseño estructural utilizadas hoy en día.

Para efectuar este tipo de revisión se requiere analizar en forma separada los criterios que se utilizan para llegar a obtener un método acorde a nuestras necesidades y condiciones existentes.

En el punto siguiente se hace una referencia al enemigo número uno que tiene una estructuración de un pavimento; el agua.

## **II. SANEAMIENTO**

Previo al estudio de criterios de diseño, se debe dejar totalmente claro que no debe malgastarse dinero en construcción de caminos si no se dispone de un estudio de evacuación de aguas. Este debe asegurar que el nivel de la napa freática estará a 1.5m. de la cota del eje de la rasante, durante su peor condición, valor universalmente aceptado.

Esta indicación, que parece muy sencilla y obvia, no siempre se cumple en los proyectos, razón que causa directamente la falla de un diseño que, aunque esté bien ejecutado, no es posible determinar su comportamiento cuando su capacidad de soporte es afectada en forma aleatoria.

Dadas nuestras condiciones geográficas se debe ser cada vez más acucioso a medida que aumentan los índices de precipitación anual. Sólo si se conoce bien este dato del problema, se puede desarrollar un método de diseño y su mantención asociada, que permita apreciar la evolución de su comportamiento. De esta manera se podrá corregir en forma lógica cualquier tipo de falla que pueda aparecer durante su vida útil debido a factores imponderables.

## **III. METODOLOGÍA DE DISEÑO**

Llegar a obtener una metodología de diseño para pavimentos en un país, es un trabajo complejo. Establecida ésta se necesita un lapso de tiempo suficientemente largo para verificar su correcto funcionamiento. Por lo general estos procesos requieren de retroalimentación con los antecedentes de los resultados obtenidos. Esta última condición no es posible obviarla con el conocimiento actual de las distintas disciplinas involucradas.

A juicio del autor, una metodología de diseño consta de dos etapas. La primera es el conocimiento del entorno, que involucra un estudio y valorización de todos los elementos existentes disponibles que puedan ser utilizados en la construcción de una carretera. Además deben formar parte de este estudio el grado de desarrollo actual y su tendencia a mediano plazo (hasta 20 años). La segunda etapa corresponde a la selección del método más apropiado. Este deberá reflejar, tanto en sus resultados económicos como estructurales, la influencia que tendrá el entorno estudiado en la primera etapa.

A continuación se analiza algunos parámetros que en primera instancia parecen relevantes, con la esperanza de que más adelante otros ingenieros aportarán sus conocimientos y experiencia para poder llegar a una metodología que represente nuestra realidad en forma integral.

### 3.1 Estudio de las características generales del entorno

**Primera Etapa:** la primera característica relevante del estudio de una metodología de diseño para caminos en nuestro país es su geología y su posición geográfica (largo y ancho). La formación geológica de nuestra cordillera es del período terciario, lo que es una indicación de la dureza de los materiales pétreos.

El ancho da una idea de la fuerte pendiente transversal al bajar en 100 Km. aproximadamente 5.000 m. de altura hasta el nivel del mar. En la Zona Central y Sur los abundantes materiales pétreos arrastrados por ríos torrentosos entregan gravas y arenas de canto rodado de excelente calidad. En la Zona Norte, desértica, existen abundantes áridos de canto vivo. Por otro lado la topografía presenta pocas partes llanas. Por último su longitud incluye los más variados climas desde desérticos hasta muy lluviosos.

Las características mencionadas influyen en forma directa en el diseño y construcción de un pavimento asfáltico, ya que se dispone de áridos de excelente calidad a corta distancia de transporte.

Debido a sus diferencias climatológicas, se deberían tener a lo menos dos sectorizaciones del país para efectos constructivos. La primera debe dar una clara indicación de tiempos disponibles de trabajo, sobre todo en la Zona Centro-Sur. La segunda sectorización importante es por temperaturas medias anuales ponderadas por mes. Ambas sectorizaciones son necesarias e indispensables dada la condición termo-plástica de las mezclas asfálticas.

Como se dijo, se dispone de una cantidad cuantiosa de materiales pétreos de excelente calidad a todo lo largo de nuestro territorio. El hecho de tener en suerte abundancia de materiales granulares, no significa de ninguna manera que estos materiales sean de un bajo valor y menos aún de una importancia secundaria en el diseño de pavimentos asfálticos.

Esta gran ventaja que representa tener buenos y abundantes materiales pétreos, es una de las diferencias más importantes que existen con otros países. Permiten que este entorno dé la posibilidad de plantear métodos de diseño que, además de eliminar la problemática del comportamiento reológico de los distintos materiales (principalmente los asfálticos), entreguen las soluciones más económicas posibles.

Es entonces, de toda evidencia, que la metodología de diseño planteada para nuestro territorio no será adecuada para otros países que no tengan condiciones similares a las del nuestro. De igual manera, se puede afirmar que la de otros países no puede ser utilizada por el nuestro, a menos que como se discute más adelante, ella contemple en la solución del problema multicapa la entrada de los parámetros de nuestro entorno.

La actual preparación y manipulación que se hace con nuestros materiales pétreos reflejan sólo en parte su calidad de capa estructural dentro del multicapa que conforma el pavimento asfáltico y ello corresponde a lo que normalmente se conoce como base granular. La capa de material pétreo aporta a la resistencia estructural del multicapa de acuerdo a su posición dentro de él. Así se tiene que una capa granular bajo un pavimento asfáltico delgado deberá soportar directamente la acción del tránsito. En cambio esta misma, bajo un pavimento asfáltico estructural, sólo servirá como una base granular.

Esta diferencia de aporte estructural es absorbida por una mayor fricción interna de los áridos. Esto significa, en otras palabras, que la capa granular con la capacidad adecuada de resistencia puede actuar en reemplazo de una asfáltica estructural. De esta manera, si se intensifica, por medio de ensayos, el análisis del comportamiento de los áridos, se podrá definir especificaciones técnicas que indiquen la preparación necesaria de los materiales granulares para las distintas posiciones en que estos materiales serán requeridos. Las áreas que deberán estudiarse son:

- Características granulométricas
- Calidad de forma
- Textura superficial
- Grado de dureza o desgaste
- Tipo de mezclado y colocación
- Compactación - Valor soporte

Hoy día hay países que han desarrollado una muy buena técnica en la utilización de materiales granulares como son Australia y Nueva Zelanda. En ambos países se está actualmente utilizando capas granulares de alta estabilidad.

### 3.2 Selección del método de diseño de espesores

**Segunda Etapa:** En esta segunda etapa corresponde seleccionar el método de diseño a utilizar. Si bien es cierto que no hay nuevas teorías matemáticas que las planteadas por Burmister, se ha logrado un avance sustancial con su solución. Al mismo tiempo el avance tecnológico experimentado tanto en mediciones físicas como en rapidez de cálculos mediante computación, han hecho posible desarrollar nuevos modelos estructurales.

Especial relevancia ha tenido el llamado método "Analítico" o "Mecanicista". Este método ha combinado de una buena manera una parte matemática con otra parte empírica, dando así paso a un método que puede ser utilizado en cualquier lugar y al mismo tiempo resolver todos los casos posibles.

El método consiste básicamente en suponer que el diseño total de un camino está formado por diversas capas que trabajan en conjunto de acuerdo a su elasticidad individual (Módulo elástico [E] y coeficiente de Poisson [V]) y que después de una sollicitación determinada fallará por fatiga del terreno natural y/o agrietamiento de la carpeta asfáltica.

Esta ley de fatiga es la parte empírica y deberá establecerse para cada entorno. Su fórmula general es:

$$N = a\varepsilon^b$$

N : Número de repeticiones medidas en E.E.

$\varepsilon$  : Deformación unitaria de la subrasante producida por un Eje Equivalente

a y b : Constantes positivas determinadas en experiencias de laboratorio y en observación del comportamiento de los pavimentos existentes.

De acuerdo a lo indicado, la solución del problema multicapa es igual para cualquier ubicación; en cambio deberá estudiarse una ley de fatiga que de alguna manera refleje el entorno. La empresa Shell, ha desarrollado un excelente método mecanicista que finalmente fue publicado en 1978. Este ha dado origen a la mayor parte de los métodos mecanicistas hoy día en uso.

Con el objeto de minimizar problemas del entorno, se ha seleccionado el utilizado en Nueva Zelanda por National Road Board (NRB) State Highway (1987). A continuación se presenta en forma resumida este método publicado en el "Manual de diseño y mantención de pavimentos" del N.R.B.

#### 3.2.1 Consideraciones generales del método

Se deja establecido que el método más adelante expuesto sólo determina espesores de capas y su término de vida útil a través de su ley de fatiga. El término de la vida útil se evidencia en;

- Una deformación permanente en la sub-rasante producida, por la compresión vertical en su parte superior, por una carga unitaria (1 EE.) y
- Grietas de fatiga en la capa asfáltica que se desarrollan en su parte inferior, por esfuerzos horizontales de tracción, producidos por una carga unitaria (1 EE.)

Efectos de densificación, pérdidas de esfuerzos de corte, deterioro superficial, homogeneidad y mantención son problemas que deberán abordarse con un detallado estudio de las especificaciones técnicas que regirán la construcción.

### 3.2.2 Consideraciones específicas

Las mezclas asfálticas son termo-plásticas, razón por la cual se debe conocer la temperatura ambiental a la que estará expuesta la mezcla. La variación de temperatura ambiental actúa sobre el módulo de elasticidad (o módulo resiliente) de un concreto asfáltico y éste se relaciona directamente con la vida útil y la magnitud de los esfuerzos inducidos por la carga vehicular. Un estudio sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas sometidas a distintas temperaturas ha sido efectuado por Shell.

Para calcular la temperatura a que estará sometida la mezcla en cualquier ubicación se utilizará el índice llamado "Término medio ponderado anual" (Edwards y Valkeming 1974).

En el gráfico de la Figura 1 se indican las ponderaciones correspondientes a cada temperatura media mensual. La media ponderada anual se obtiene como sigue:

- Se entra con la temperatura media mensual de cada mes y se obtiene su ponderación.
- La suma de las doce operaciones se promedian y se obtiene el promedio anual.
- Con este último se entra al gráfico de la Figura 1, y se obtiene la temperatura media ponderada anual que se utiliza en los gráficos de las Figuras 2 y 3.

En estos últimos se muestran las curvas de diseño que relacionan los E.E. de diseño, espesor de la carpeta asfáltica, espesor de las capas granulares y C.B.R. de diseño de la sub-rasante. Todo esto para una determinada temperatura. El graneado de la Figura 2 es para 12° y el de la Figura 3 para 16° de temperatura media ponderada anual.

Si la localidad correspondiente al diseño tiene una temperatura diferente, se utilizarán los gráficos de las dos figuras. El resultado será obtenido por interpolación o extrapolación de los resultados de ambos gráficos.

Los gráficos de diseño están basados en la falla del sistema multicapa, por fatiga del material de la sub-rasante, habiéndose tomado los debidos resguardos en los espesores de la carpeta asfáltica, para que ésta no induzca grietas.

Se ha considerado, para la mezcla asfáltica y su fatiga, la expuesta en el método Shell denominada SI-FI-100 en que:

S1 = Código por rigidez (mezclas densas)

FI = Código por fatiga (mezclas con bajo contenido de asfalto y bajo porcentaje de huecos).

100 = Penetración del asfalto (representa 80-100,85 -100,80-120, etc).

El módulo de elasticidad (E) está comprendido entre 1900 a 3700 MPa.

## IV. DISEÑO ESTRUCTURAL

El espesor necesario de carpeta asfáltica y material granular (base más sub-base) se obtiene como sigue:

- Se entra a los gráficos de las Figuras 2 y/o 3 con los EE. de diseño
- Se intercepta el valor del C.B.R. de diseño.
- En abscisa se obtiene el espesor total de las capas asfálticas.
- Se repite el proceso con el gráfico enfrentado
- En abscisa se obtiene el valor total de capas granulares
- Se entra al gráfico de la Figura 4 con el espesor total del granular y se obtiene el espesor de base y sub-base respectivamente.

Con este método de diseño se pueden obtener variadas soluciones. A modo de ejemplo, se presenta un diseño de las siguientes características:

|                |                 |
|----------------|-----------------|
| E.E. de diseño | $2 \times 10^7$ |
| CBR de diseño  | 3%              |

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| Temperatura ponderada anual  | 16°C                                 |
| Del lado izquierdo del gráfico de la Figura 3,<br>se obtiene el espesor de la carpeta asfáltica: | 190mm                                |
| Del lado derecho el espesor de las<br>capas granulares:  | 380 mm                               |
| Del gráfico de la Figura 4:  | Base -->150 mm<br>Sub-Base —>230 mm. |

Si en nuestro entorno se obtiene material con C.B.R. = 20%, caso de frecuente ocurrencia en nuestro país, es posible mejorar el diseño como sigue:

|                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| EE. de diseño                      | :2x 107  |
| CBR de diseño                      | :20%     |
| T.M.A.P.                           | :16°C    |
| Espesor carpeta asfáltica          | :90 mm.  |
| Espesor total granulares           | :260 mm. |
| Base                               | :150 mm. |
| Sub-base                           | :110 mm. |
| Material de sub-rasante (CBR = 20) | :550 mm. |

La variante planteada para este diseño será conveniente si el costo de 550 mm. de CBR 20% es menor que el costo de:  
100 mm. de carpeta asfáltica más  
120 mm. de sub-base

El espesor de 550 mm. de material está dado para asegurar el CBR 20% como CBR de diseño. Se obtiene como ventaja adicional, al colocar esta capa, la uniformidad del valor soporte de la sub-rasante.

Por último, se debe recordar que el valor de soporte de las distintas capas estructurales deberá estar claramente indicado en las especificaciones técnicas. Las mezclas asfálticas deberán ser diseñadas por el método Shell.

### **BIBLIOGRAFÍA**

1. Shell Company, Pavement Design Manual, 1978
2. National Board Road, Pavement Design, NBR State Highway, Nueva Zelanda. 1987.

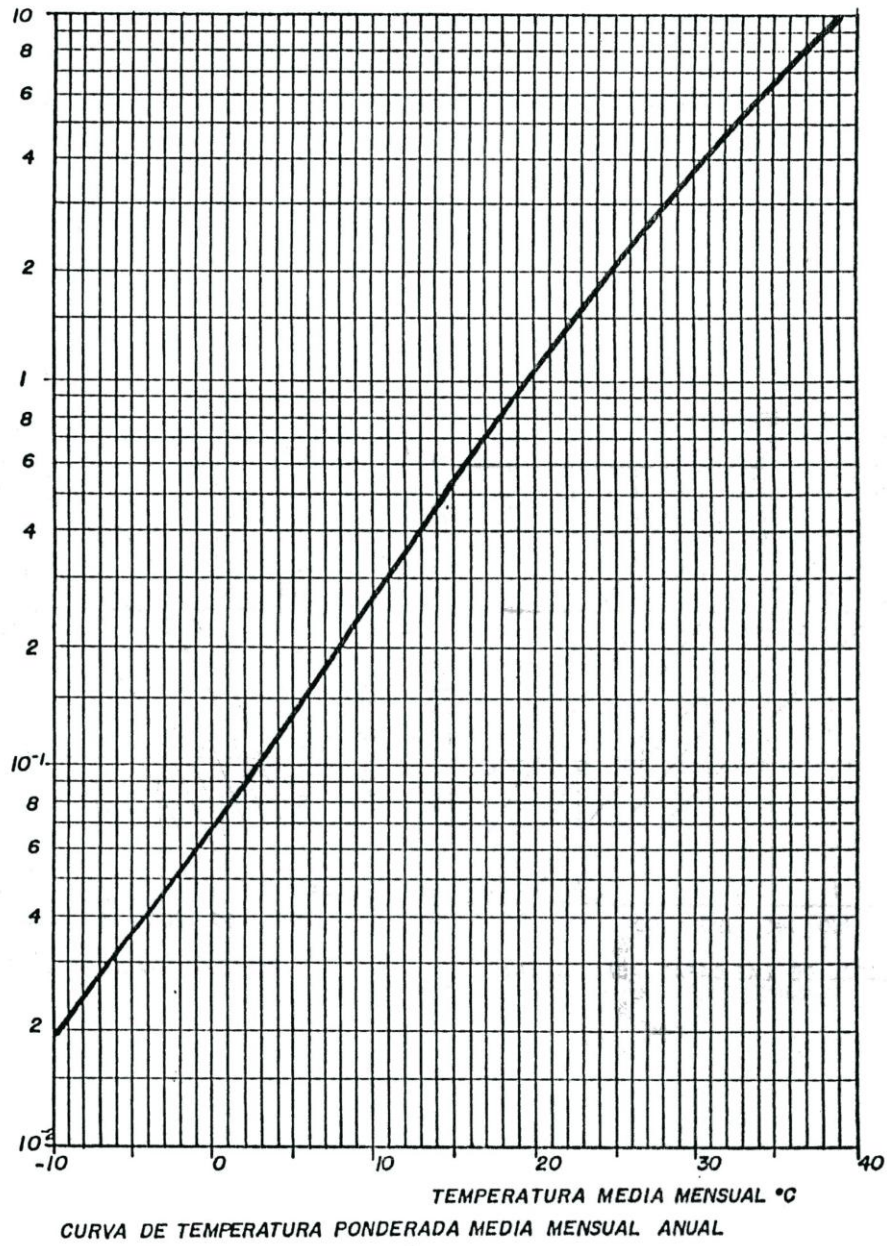


Figura 1 Factor de ponderación

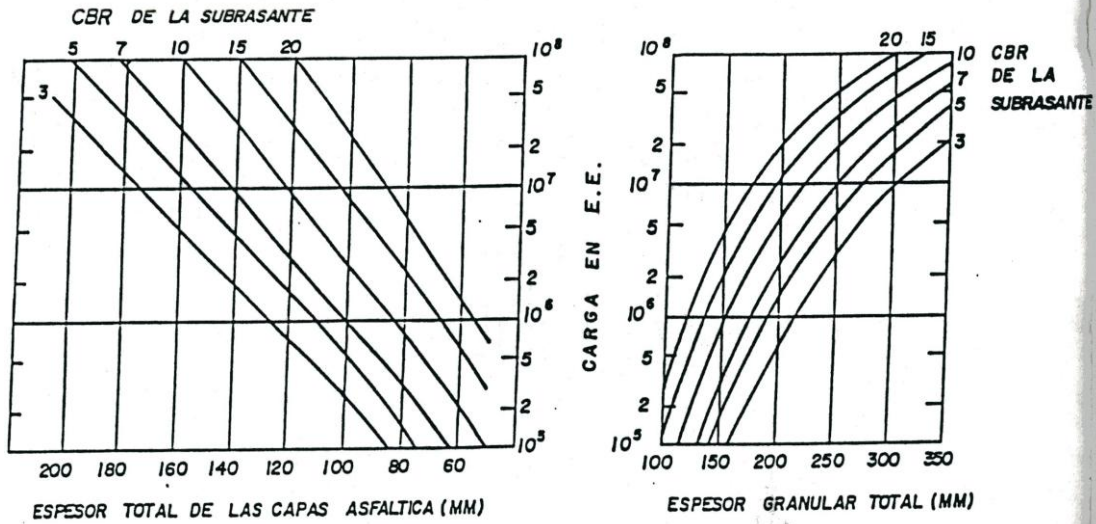


Figura 2 Gráfico para diseño del pavimento con capas asfálticas estructurales, temperatura anual ponderada = 12°

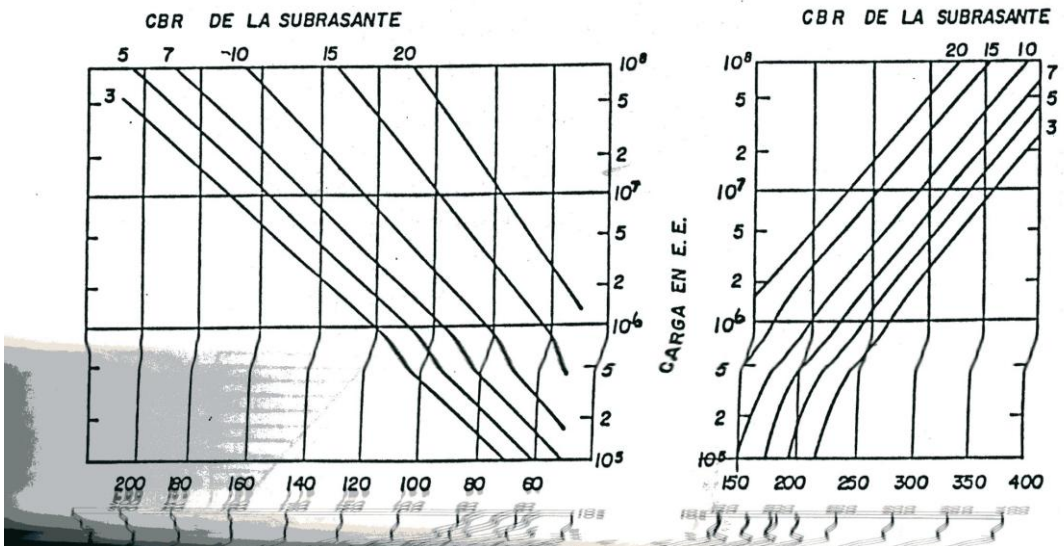


Figura 3 Gráfico para diseño del pavimento con capas asfálticas estructurales, temperatura anual ponderada = 16°



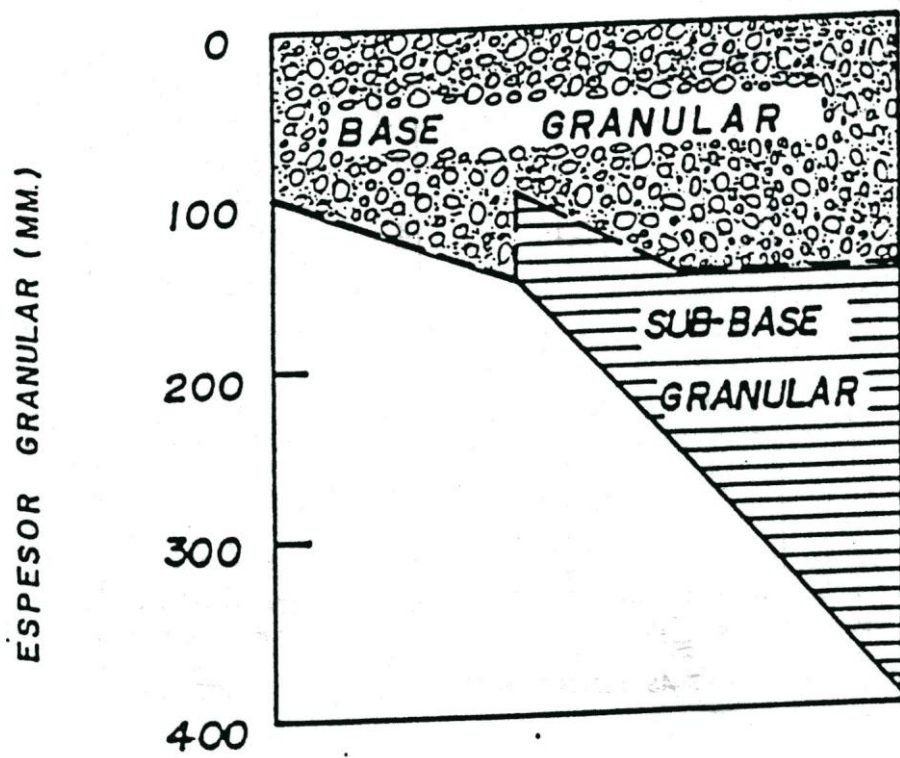


Figura 4 Determinación de bases granular, pavimento concreto asfáltico estructural