

EVALUACION DE UN MODELO AVANZADO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y SU COMPARACION CON LOS METODOS TRADICIONALES

Arnaldo Carrillo Gil (1), Eduardo Carrillo Delgado (2), Ivan Vera Aliaga(2), Oscar Donayre Cordova (2)

Resumen

Tradicionalmente, el diseño de pavimentos flexibles se ha realizado siguiendo los métodos de diseño del Instituto del Asfalto y AASHTO. Este trabajo presenta una nueva metodología de diseño, la cual se realiza utilizando el programa de cómputo *Kenlayer*. El análisis estructural de pavimento ejecutado por el *Kenlayer* se lleva a cabo considerando las características propias de los materiales constitutivos de las diferentes capas de pavimento, es decir, considera al asfalto como material viscoelástico; y a los materiales granulares para bases y subbases y a los materiales finos de subrasante como materiales de esfuerzos sensitivos, esto es, con un comportamiento que depende del nivel del esfuerzo al cual se le somete. En el trabajo se compara, en base a un diseño real para una vía, los métodos de diseño tradicionales y la aplicación del programa de cómputo presentado, con el fin de realizar una evaluación de los resultados obtenidos por cada una de las metodologías, estableciendo su conveniencia económica y aplicaciones ingenieriles modernas.

I.- INTRODUCCIÓN

La práctica común para el diseño de pavimentos flexibles considera dos metodologías, una presentada por el Instituto del Asfalto y la otra por AASHTO. En ambos casos el procedimiento de diseño se realiza empleando una serie de tablas y gráficas, las cuales se utilizan conociendo previamente ciertas características del pavimento como la resistencia de los materiales a emplear y el análisis de tráfico al cual el sistema será sometido para obtener como respuesta el espesor de pavimento requerido.

Entre 1954 y 1969 el Instituto del Asfalto publicó 8 ediciones de su Manual de Diseño de pavimentos de flexibles. Los procedimientos recomendados en estos manuales eran de carácter empírico. Las ediciones séptima y octava se basaban en datos obtenidos en los diversos ensayos de caminos realizados en Estados Unidos y Gran Bretaña. El método del Instituto del Asfalto, cuya última versión data de 1991, determina los espesores de pavimento siguiendo un procedimiento mecánico-empírico, utilizando para ello la teoría de mecánica de multicapas en conjunto con criterios de falla empíricos (falla por fatiga en la parte inferior de la capa de asfalto y falla por deformación permanente en la parte superior de la subrasante). La última versión presenta una serie de cartas de diseño las cuales se desarrollaron con ayuda del programa de cómputo DAMA (IA).

El procedimiento de diseño recomendado por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) se basa en los resultados obtenidos en el Ensayo de Caminos

AASHO realizado en Ottawa, Illinois, USA, durante los últimos años de la década de los 50 y los primeros del 60. Las ecuaciones empíricas de diseño obtenidas en el mencionado Ensayo de Caminos son de utilidad como modelos básicos en la guía de diseño actual, pero han sufrido ciertas modificaciones para que los resultados que proporcionan sean aplicables a otras regiones con características climáticas y de materiales empleados distintos a las presentes en la región donde se llevó a cabo el ensayo.

Investigaciones efectuadas establecen que el procedimiento de diseño del Instituto de Asfalto plantea resultados conservadores, especialmente para pavimentos intensamente transitados; observándose una sobreestimación del espesor de la capa de asfalto empleada del orden de 1.61 pulgadas en promedio con una desviación estándar de 1.24 pulgadas.

Estas inexactitudes pueden explicarse por el hecho de que los procedimientos empleados involucran el uso de tablas y gráficas de diseño generales que se emplean sin importar las condiciones de trabajo reales a las cuales se pueda enfrentar el diseñador. Además, dichas tablas y gráficas de diseño fueron derivadas haciendo ciertas simplificaciones en lo concerniente tanto a la influencia de los efectos ambientales producidos en los valores de los parámetros de resistencia - módulos resilientes - de los materiales a utilizar así como a la configuración de las cargas por rueda realmente aplicadas – ejes simples, tándem y trídem - por medio de la “homogeneización” de cargas a cargas por rueda de eje dual simple equivalente a 18000 libras, obviando por completo la realización de un análisis estructural formal para el sistema de pavimento que considere las condiciones reales en las cuales éste prestará servicio. Por todos estos argumentos, hemos creído necesario que para diseños de pavimentos más reales, la práctica del diseño por medio de un análisis estructural del sistema de pavimento ajustado a las condiciones de trabajo a las que será sometido en la realidad.

II. FUNDAMENTO TEÓRICO DEL MODELO CONSTITUTIVO

El análisis estructural a realizar para el diseño de pavimentos tiene por objetivo el cálculo de los valores de ciertas deformaciones unitarias en determinadas posiciones críticas del pavimento para su aplicación en un análisis de daños por criterios de falla que nos permitirá la estimación de la vida de diseño del pavimento. Dichos criterios de falla son el criterio de falla de agrietamiento por fatiga y el criterio de falla por deformación permanente.

Los valores a emplear en las ecuaciones del modelo empleado, se determinan en base a un análisis estructural, el cual puede ejecutarse sea considerando a todos los materiales constituyentes de las capas como perfectamente elásticos (Análisis Lineal Elástico); o considerando a los materiales de base, sub base (si la hubiera) y sub rasante como materiales sometidos a esfuerzos sensitivos (Análisis No Lineal Elástico), y por último, considerando al material asfáltico comportándose de manera viscoelástica.

Las soluciones para sistemas elásticos de varias capas bajo carga por rueda simple (problema básico), pueden ser extendidas a casos que involucran cargas por ruedas múltiples aplicando el principio de superposición después de descomponer los esfuerzos debido a cada una de las cargas en sus componentes σ_x , σ_y , τ_{xy} , τ_{yz} y τ_{xz} . Durante la superposición se debe tener especial cuidado en tomar el signo apropiado para cada esfuerzo.

Luego de obtener por superposición los esfuerzos σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} y τ_{xz} , los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 , pueden ser obtenidos resolviendo la siguiente ecuación cúbica:

$$\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2)\sigma - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{yz}\tau_{xz}\tau_{xy} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0$$

Estos esfuerzos pueden utilizarse para realizar el análisis elástico-no lineal y las deformaciones unitarias principales ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3 , se determinan por las ecuaciones:

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] / E \\ \epsilon_2 &= [\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)] / E \\ \epsilon_3 &= [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] / E\end{aligned}$$

Para el análisis de daños por fatiga se utiliza la deformación unitaria por tracción horizontal principal ya que ésta es la deformación que causa el inicio del agrietamiento en el fondo de la capa de asfalto. La deformación por tracción horizontal es determinada por:

$$\epsilon_t = [\epsilon_x + \epsilon_y / 2] - \{[(\epsilon_x - \epsilon_y) / 2]^2 + \gamma_{xy}^2\}^{1/2}$$

El Análisis por capas Elásticas No Lineales se desarrolla considerando que los materiales granulares y los suelos de sub rasante tienen un comportamiento Elástico No Lineal; es decir, sus valores de módulo de elasticidad varían con el nivel de esfuerzos a los cuales son sometidos. El módulo de elasticidad de los materiales granulares se incrementa con el aumento de la intensidad del esfuerzo, mientras que en los suelos finos el módulo disminuye con el incremento de la intensidad del esfuerzo. Si se conoce la relación entre el módulo de elasticidad y la condición de esfuerzo se puede aplicar un método de aproximaciones sucesivas para el cálculo del módulo de elasticidad del material.

III. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE CÓMPUTO KENLAYER

El Programa de cómputo *Kenlayer* es utilizado para analizar pavimentos flexibles. El problema básico que resuelve el *Kenlayer* consiste en sistemas de pavimentos de varias capas de material elástico sometidos a una carga circular. En caso que el pavimento sea sometido a ruedas múltiples (duales, tándem o trídem), las soluciones obtenidas en el problema básico son superpuestas; en caso que el sistema consista de materiales elásticos no lineales la solución del sistema pasa por un proceso iterativo, y en caso que el sistema posea capas de material viscoelástico las soluciones del problema básico son ajustadas para diferentes duraciones de carga y temperaturas. Así, el *Kenlayer* puede ser aplicado a sistemas de varias capas sometidos a cargas de rueda simple, dual, dual tándem o dual trídem con cada capa comportándose de manera diferente, sea de manera elástica-lineal, elástica-no-lineal o viscoelástica. El programa puede realizar análisis de daños, dividiendo cada año en un máximo de 24 periodos, si se desea, cada uno con un conjunto diferente de propiedades de material. Cada periodo puede tener un máximo de 24 grupos de carga. La vida de diseño es calculada acumulando el daño por agrietamiento por fatiga y deformación permanente causado durante cada periodo por todos los grupos de carga.

El *Kenlayer* está escrito en FORTRAN 77. En la versión que utilizamos puede aplicarse a un sistema de pavimento de 19 capas como máximo. En el análisis de ruedas simples, se puede obtener resultados hasta para 10 coordenadas radiales y 19 coordenadas verticales, es decir, un total de 190 puntos. Para análisis de ruedas múltiples, además de las 19 coordenadas verticales, se puede obtener soluciones en 25 puntos, especificando las coordenadas x e y de cada punto.

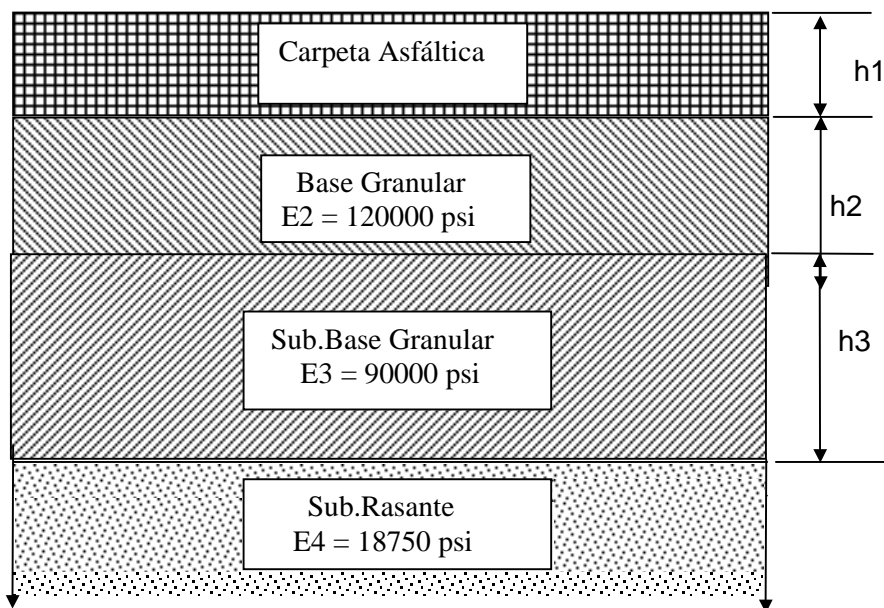
IV. APLICACIONES Y RESULTADOS DE DISEÑO

En el apartado anterior hemos visto que el programa de cómputo *Kenlayer* tiene tres formas de aplicación. La primera se lleva a cabo considerando a todos los materiales constituyentes de las capas de pavimento como materiales perfectamente elásticos (análisis elástico), es decir con sus propiedades de resistencia (módulo de elasticidad o módulo resiliente) constantes e independiente del nivel de esfuerzo al que se somete el pavimento; la segunda forma de aplicación del *Kenlayer* (análisis elástico no lineal) se lleva a cabo considerando las características de esfuerzo sensitivas de las propiedades de resistencia de los materiales de base, subbase (si la hubiera) y de la subrasante, es decir con los valores de los módulos resilientes de estas capas variando con el nivel de esfuerzo al cual se las somete; y la tercera forma de análisis se efectúa considerando al material asfáltico como material de comportamiento viscoelástico (análisis viscoelástico).

Se ha visto también que para realizar un análisis elástico no lineal y un análisis viscoelástico, se requiere la ejecución de diversos ensayos de laboratorio, para lo cual no se cuenta con las facilidades y equipos necesarios en el país. En efecto, en el caso de un análisis elástico no lineal es requisito indispensable determinar de manera experimental los valores de los coeficientes K_1 , K_2 , K_3 y K_4 para su ingreso en el archivo de datos para la ejecución del *Kenlayer*. El equipo para llevar a cabo este ensayo es una celda triaxial con un dispositivo de carga que permita someter al testigo a repeticiones de carga que simulen el paso de las cargas de tráfico. Por otro lado, en el caso de un análisis viscoelástico, se hace necesario el ingreso de las deformaciones por deslizamiento longitudinal (creep compliances) a una temperatura de referencia para la obtención de las respuestas a cualquier otra temperatura de trabajo empleando el principio de superposición tiempo temperatura. Las dificultades para realizar estos ensayos nos han forzado a limitar el presente trabajo a la realización de análisis elástico lineal (MATL).

El presente trabajo compara los resultados obtenidos para tres alternativas de diseño para una vida útil de 25 años. La primera alternativa considera carpeta asfáltica, base granular, sub base granular y sub rasante; la segunda alternativa considera carpeta asfáltica, base asfáltica, base granular y sub rasante; y la tercera considera asfalto a profundidad completa sobre la subrasante. Estas alternativas se pueden observar en la figura 1. En dicha figura, que no se encuentra a escala, se muestran los parámetros de resistencia (módulos resilientes) de los materiales empleados.

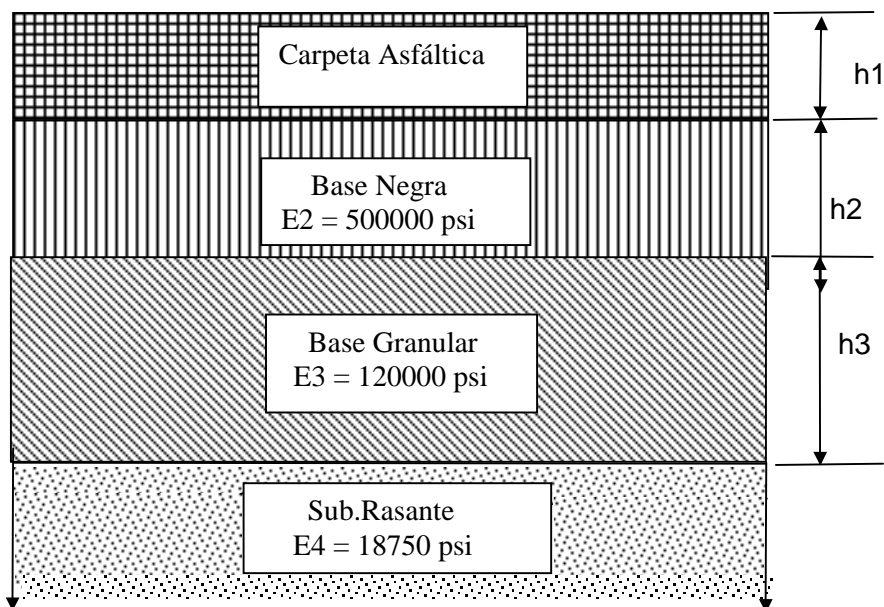
Alternativa 1: Carpeta Asfáltica + Base Granular + Sub.Base Granular + Sub.Rasante



E: Módulos Resilientes Empleados
h: Espesores de Capas (Variables)

Figura 1.a. Alternativa 1 de Diseño a Analizar

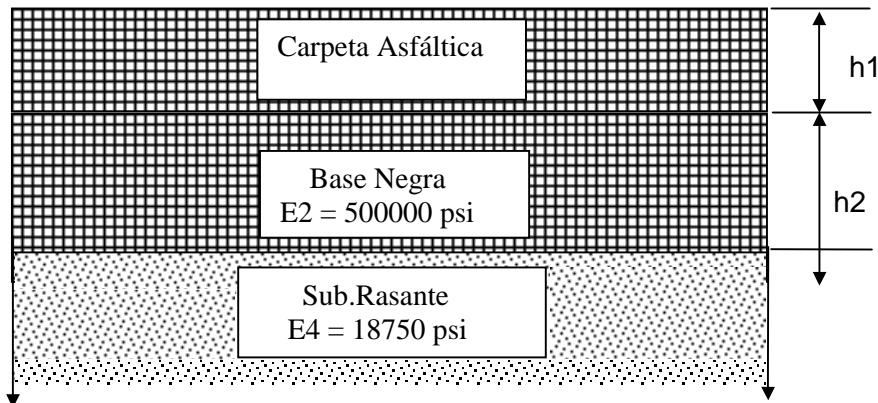
Alternativa 2: Carpeta Asfáltica + Base Negra + Base Granular + Sub.Rasante



E: Módulos Resilientes Empleados
h: Espesores de Capas (Variables)

Figura 1.b. Alternativa 2 de Diseño a Analizar

Alternativa 3: Carpeta Asfáltica + Base Negra + Sub.Rasante



E: Módulos Resilientes Empleados
h: Espesores de Capas (Variables)

Figura 1.c. Alternativa 3 de Diseño a Analizar

El procedimiento seguido en este trabajo consiste en determinar la variación de los valores de las vidas de diseño para las alternativas planteadas conforme hacemos variar los espesores de las capas empleadas. De este modo, el diseño que se plantea será aquél que nos proporcione la vida de diseño solicitada (25 años) empleando la menor cantidad de materiales (es decir los menores valores de los espesores de capas) posible.

Datos de Ingreso

Sea cual fuere la alternativa de diseño a analizar, cuando el análisis a ejecutar es de tipo Elástico Lineal, los datos fundamentales a ingresar son el número de capas que conforma el sistema de pavimento, los espesores de estas capas, la condición de adherencia entre capas, el módulo de Poisson de los materiales, los módulos de elasticidad (resilientes) de las capas, y la configuración de cargas y el número de repeticiones a las que se someterá el pavimento. Se considera además que las propiedades de los materiales se mantienen constantes para todo el año; es decir, las influencias del clima en ellas no son tomadas en cuenta ($NPY = 1$).

El número de capas que conforma la estructura de pavimento para cada una de las alternativas se obtiene de inmediato al observar la figura 1. Por otro lado, como ya se ha dicho, los espesores de las capas se harán variar hasta obtener el diseño más conveniente. Las interfaces entre capas se suponen perfectamente adheridas debido a los trabajos de imprimación a los que se somete la estructura de pavimento durante el proceso constructivo.

Los valores de los módulos de Poisson empleados son los que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Módulos de Poisson Empleados para las Diferentes Capas de Pavimento

Material	Rango	Utilizado
Material Asfáltico	0,30 – 0,40	0,35
Materiales Granulares	0,30 - 0,40	0,35
Materiales Finos	0,30 - 0,50	0,45

El valor E utilizado para los materiales asfálticos es un valor típico basado en las recomendaciones dadas en la tabla 2.

Tabla 2 Valores Típicos para el Módulo de Elasticidad de Materiales Asfálticos

Temperatura (°C)	Frecuencia de Carga (Hz)					
	1		4		16	
	Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio
4	6,0 - 18,0	12.0	9,0 - 27,0	16.0	10,0 - 30,0	18.0
21	2,0 - 6,0	3.0	4,0 - 9,0	5.0	5,0 - 11,0	7.0
38	0,5 - 1,5	0.7	0,7 - 2,2	1.0	1,0 - 3,2	1.6

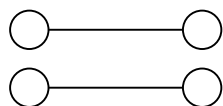
Nota: Los módulos de elasticidad se expresan en términos de 10^5 psi.

Si tenemos en cuenta que la temperatura media anual en Lima es de 18.5° C y que una velocidad de tráfico de 55 KPH corresponde a una frecuencia de carga de 8 Hz, es razonable emplear, de acuerdo a lo señalado en la tabla 2, un valor E igual a 500000 psi. para el material asfáltico.

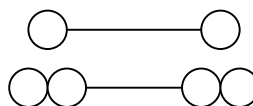
Para la determinación de la configuración y el número de repeticiones de carga se consideraron los siguientes tipos de vehículos:

- Vehículos de transporte público (dos ejes simples)
- Camiones de dos ejes (un eje simple + un eje dual)
- Camiones de tres ejes (un eje simple + un eje tándem)
- Tráiler y Semi Tráiles (un eje simple + dos ejes tándem)

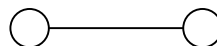
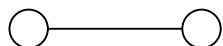
En la figura 2 se puede ver una vista en planta de las superficies de contacto rueda - pavimento de cada uno de estos vehículos. Esta figura no se encuentra a escala:



Transporte Público
(02 eje simples)



Camión dos Ejes
(01 eje simple + 01 eje dual)



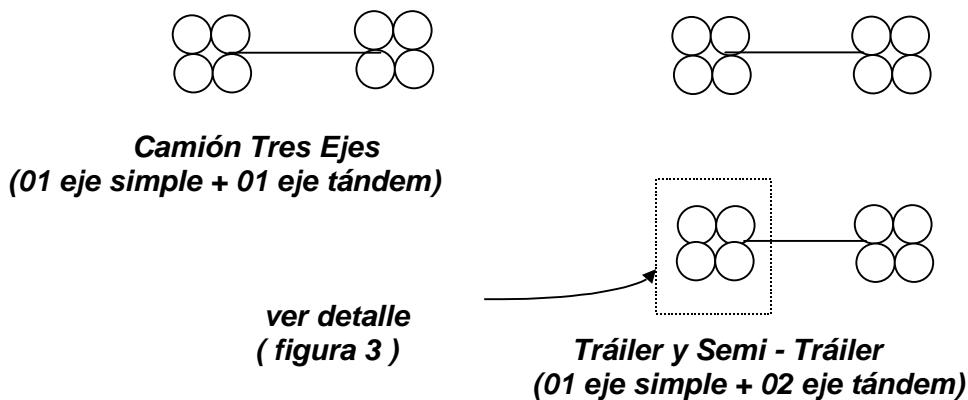


Figura 2. Vista en Planta de las Cargas Impuestas al Pavimento por los Vehículos Considerados en el Análisis de Tráfico

El radio de contacto neumático – superficie de pavimento en todos los casos es igual a 4.52 pulgadas (115 mm), el espaciamiento dual centro a centro de rueda es igual a 13.57 pulgadas (345 mm), el espaciamiento tándem es igual a 1.20 m (48 pulgadas). En la figura 15 se muestra el detalle de un conjunto de ruedas tándem.

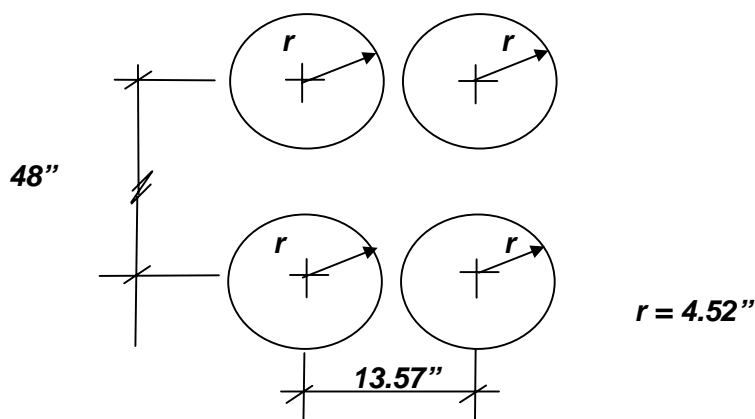


Fig 3. Detalle de Conjunto de Ruedas Tándem

Las cargas transmitidas al pavimento por cada uno de los tipos de ejes se muestra en la tabla 3:

Tabla 3 Cargas Transmitidas al Pavimento por Eje y por Rueda

Tipo de Eje	Carga Transmitida al Pavimento (Libras)	Número de Ruedas en el Eje	Carga por Rueda (Libras)
Simple	9000	2	4500
Dual Simple	18000	4	4500
Tándem	36000	8	4500

A continuación determinaremos la presión de contacto por rueda

Presión de Contacto = (Carga por Rueda) / (Área de Contacto por Rueda)

$$= 4500 / (\pi * 4.52^2) = 70 \text{ Libras/Pulgada}^2$$

Presión de Contacto = 70 psi.

El número de repeticiones por año para cada uno de los vehículos se muestra en la tabla 4. En dicha tabla también se muestra el número de repeticiones por cada tipo de eje considerado.

Tabla 4. Determinación del número de repeticiones por cada configuración de carga

Tipo de Vehículo	vehículos/vía	vehículos/carril	Repeticiones Eje Simple	Repeticiones Eje Duales	Repeticiones Eje Tándem
Transporte Público (2 ejes simples)	2330000	291250	582500		
Camión dos Ejes (1 eje simple + 1 eje dual)	810000	101250	101250	101250	
Camión Tres Ejes (1 eje simple + 1 eje tándem)	622000	77750	77750		77750
Tráiler y Semi-Tráiler (1 eje simple + 2 ejes tándem)	156000	19500	19500		39000
	TOTAL		781000	101250	116750

V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Al analizar los resultados es notoria la diferencia existente entre los espesores de cada estructura del pavimento al realizar el diseño utilizando las metodologías tradicionales (Instituto del Asfalto y AASHTO) y los propuestos por el método *Kenlayer*. Es más, al comparar las configuraciones planteadas por los dos métodos tradicionales las diferencias son también de importancia. A continuación establecemos conclusiones caso por caso, de acuerdo a las configuraciones de diseño del pavimento obtenidas al emplear cada una de las metodologías y mostraremos, también, una comparación tanto entre los espesores por capa obtenidos así como en los costos aproximados por metro cuadrado de cada alternativa sugerida.

Caso 1: Carpeta Asfáltica + Base Granular + Sub.Base Granular + Sub.Rasante

Los resultados revelan que los espesores solicitados para la carpeta asfáltica son los mismos (10 cm) sin importar el método empleado. Las diferencias se hacen notorias cuando comparamos los espesores solicitados para la Base Granular y la Sub.Base Granular. En el caso de Base Granular el mayor espesor de capa lo requiere el método del Instituto del Asfalto (40 cm), lo sigue el *Kenlayer* (30 cm) y el que solicita la menor cantidad de material es AASHTO (25 cm). Por otro

lado, al considerar la Sub.Base Granular, nuevamente es el Instituto del Asfalto la metodología que propone el empleo de mayor cantidad de material (50 cm), seguido por AASHTO (48 cm), en tanto que el *Kenlayer* es el que, sensiblemente, exige menor cantidad de material de Sub.Base (25 cm).

Todo lo expuesto en el párrafo anterior, traducido a costos, significa que la metodología con la que se obtiene la configuración de pavimento más cara resulta ser la del Instituto del Asfalto. En la figura 5 se muestra una comparación de los costos de las alternativas de diseño propuestas por cada una de las metodologías. En dicho gráfico observamos que la alternativa planteada por AASHTO cuesta un 94% de la planteada por el Instituto del Asfalto y aquella planteada por el *Kenlayer* cuesta sólo un 90% de la del Instituto del Asfalto.

Caso 2: Carpeta Asfáltica + Base Negra + Base Granular + Sub.Rasante

De los resultados se puede ver que los métodos AASHTO y *Kenlayer* solicitan el mismo espesor de capa para la Carpeta Asfáltica (7.5 cm), y este espesor es menor al requerido por el método del Instituto del Asfalto (10 cm). Lo dicho también se cumple para el caso de la Base Negra, sólo que la diferencia de espesores se hace más importante (espesor de Base Negra para AASHTO y *Kenlayer* igual a 10 cm; espesor de Base Negra para Instituto del Asfalto igual a 25 cm). En el caso de Base Granular, la situación cambia, ya que el método que exige mayor cantidad de material es ahora AASHTO (24 cm), lo sigue el Instituto del Asfalto (15 cm), y finalmente el *Kenlayer* que requiere 10 cm. de Base Granular.

Al hacer una comparación de los costos, otra vez el método del Instituto del Asfalto resulta en el diseño más caro. Así, al observar la figura 5 y tomando como 100% el costo del diseño planteado por el Instituto del Asfalto, vemos que el costo del diseño obtenido por AASHTO se reduce al 74%, mientras que el diseño propuesto por el *Kenlayer* se reduce al 63%.

Caso 3: "Full Depth"

De acuerdo a lo observado en la figura 4, el método del Instituto del Asfalto es el que requiere mayor cantidad de material en conjunto de Carpeta Asfáltica y Base Negra (45 cm) y por lo tanto resulta en la alternativa de diseño más cara. El método del Instituto del Asfalto requiere un espesor de 26 cm. y su costo se reduce a un 57% del costo del diseño propuesto por el Instituto del Asfalto. El *Kenlayer* plantea la alternativa de diseño más económica con un espesor de 22.5 cm. y un costo del 50% de la alternativa planteada por el Instituto del Asfalto.

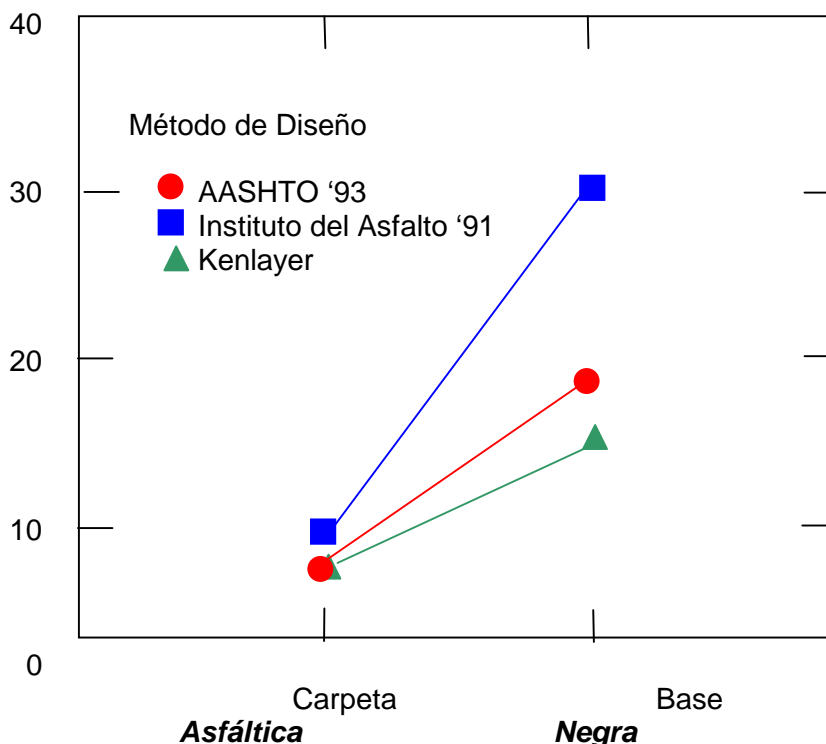
Finalmente concluimos que si sólo tomamos los diseños propuestos por el Instituto del Asfalto (el método que plantea los diseños más caros) y realizamos una comparación de los costos que cada uno de los casos plantea, concluimos que el diseño más caro resulta, largamente, el caso 3 (full depth), y el método de diseño más económico el *Kenlayer*, dado a que se acerca más a los valores reales de esfuerzos, respuesta geotécnica de los materiales que lo constituyen, aplicaciones teóricas y metodología reciente.

Referencias

- AASHTO, 1993. *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highways and Transportation Officials
- AI, 1991. *Thickness Design - Asphalt Pavements for Highways and Streets*, Manual Series No. 1, Asphalt Institute.
- BURMISTER, D.M., 1945. "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems," *Journal of Applied Physics*, Vol. 16.
- CARRILLO, GIL A., 1990, "Análisis del comportamiento de los pavimentos" *Forum La Rehabilitación y Mantenimiento de Carreteras*, Colegio de Ingenieros del Perú.
- CARRILLO, GIL A., 1993 "Pavimentos urbanos :Proyectos de rehabilitación adecuados y económicos", V *Congreso Nacional de Mecánica de Suelos*, Lima.
- HUANG, Y. H., 1993. *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, New Jersey.
- HWANG, D., and M. W. WITZAC, 1979. *program DAMA (Chevron), User's Manual*, Department of Civil Engineering , University of Maryland.
- SHOOK, J.F., F.N. FINN, M.W. WITZACK, and C.L. MONISMITH, 1982. "Thickness Design of Asphalt Pavements - The Asphalt Institute Method," *Proceedings, 5th international Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. 1.
- TIMOSHENKO, S. ,and I.N. GOODIER, 1951. *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York.

- (1) **Profesor Emérito, Universidad Nacional Ingeniería, Profesor de Ingeniería Civil de la Universidad Ricardo Palma**
- (2) **Miembros de A.C Ingenieros Consultores S.A.C**

Espesor (cm)



Estructura de Pavimento

Figura 4. Comparación de Espesores de Capas para el Caso 3. Full Depth

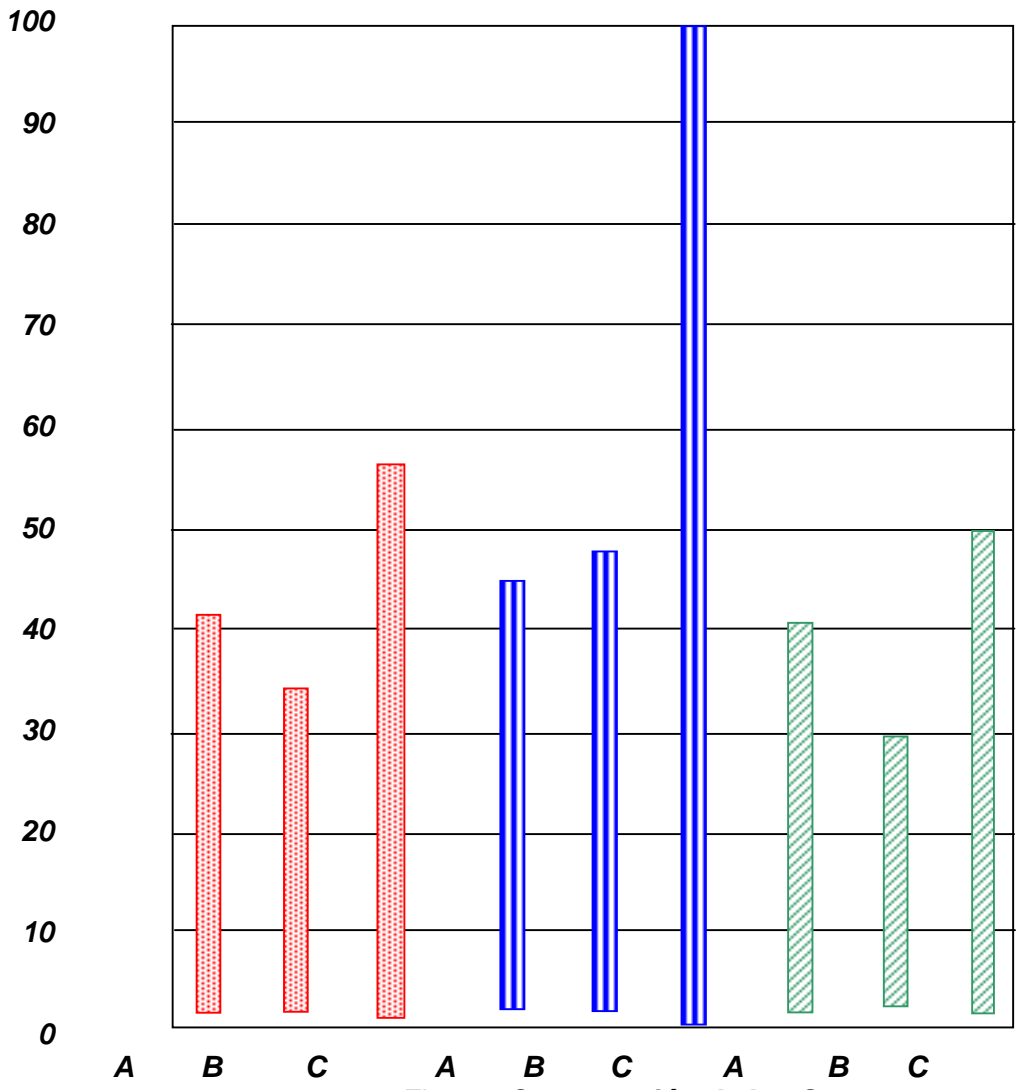


Fig. 5. Comparación de los Costos

Estructura de Pavimento

A: Caso 1
 Carpeta Asfáltica+Base Granular +Sub.Base Granular

B: Caso 2
 Carpeta Asfáltica+Base Negra+Sub.Base Granular

C: Caso 3
 Full Depth

Método de Diseño:

AASHTO 93 

Instituto del Asfalto 91 

Kenlayer 