



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Escuela Nacional de Estudios Profesionales A R A G O N

CORRELACION DE LA TECNOLOGIA MEXICANA PARA
EL PROYECTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES (PORTER
MODIFICADA) CON LOS RESULTADOS DEL TRAMO
DE PRUEBA DE LA AASHO EN OTTAWA ILLINOIS
E. U. A. (1962)

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
RICARDO RODRIGUEZ CORDERO

San Juan de Aragón, Méx.

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

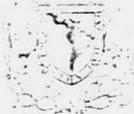
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Div 124

59st 29495

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGON
DIRECCION

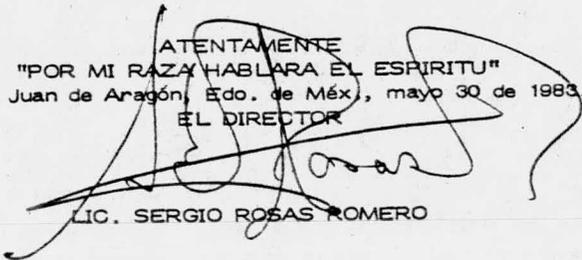


RICARDO RODRIGUEZ CORDERO
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 24 de mayo del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. FERNANDO OLIVERA BUSTAMANTE pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado "CORRELACION DE LA TECNOLOGIA MEXICANA PARA EL PROYECTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES (PORTER MODIFICADA) CON LOS RESULTADOS DEL TRAMO DE PRUEBA DE LA AASHO EN OTTAWA ILLINOIS E.U.A. (1962)", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para reiterar a usted las bondades de mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, Edo. de Méx., mayo 30 de 1983.
EL DIRECTOR



LIC. SERGIO ROSAS ROMERO

c.c.p. Coordinación de Ingeniería.
Unidad Académica.
Departamento de Servicios Escolares.
Director de Tesis.

A mis padres:

ANTONIO RODRIGUEZ HERNANDEZ

SARA CORDERO DE RODRIGUEZ

A mis hermanos:

CARLOS, VIRGINIA, LINA

JUAN ANTONIO E IRENE

A mi sobrino:

LUIS ALBERTO

A el M en I e I. C. FERNANDO OLIVERA BUSTAMANTE
agradeciendo su orientación y consejos que hi-
cieron posible la realización de este trabajo.

A MIS MAESTROS.

A MIS AMIGOS.

I N D I C E

	T E M A	Páginas
	Introducción	1
Capítulo I.	Descripción del tramo de prueba AASHO construido en Ottawa Illinois (1960) .	4
Capítulo II.	Conclusiones del tramo de prueba AASHO .	7
Capítulo III.	Aplicaciones del tramo de prueba AASHO .	12
Capítulo IV.	Método de diseño AASHO para estructu-- ras de pavimento flexible basado en el tramo de prueba de Ottawa Illinois . .	31
Capítulo V.	Correlación de algunos métodos para el diseño de estructuras de pavimento fla xible con el método de la AASHO . . .	58
Capítulo VI.	Correlación de la tecnología mexicana_ para el proyecto de pavimentos flexi-- bles con el método de diseño AASHO . .	70
Capítulo VII.	Conclusiones	90
	Bibliografía	93

INTRODUCCION

Con el advenimiento de los vehículos automotores, se hizo necesario construir caminos que proporcionaran una superficie de rodamiento adecuada a la velocidad y a la intensidad de las cargas impuestas por estos vehículos, además de soportar las condiciones adversas del medio ambiente (erosión pluvial y eólica principalmente) para evitar interrumpir su servicio con constantes reconstrucciones, o un mantenimiento excesivo. Debido a lo anterior, se fueron desarrollando métodos para el diseño de pavimentos, algunos de ellos muy sofisticados, que consideran el efecto de la transmisión de esfuerzos a la masa del suelo por la acción de una carga aplicada superficialmente y emplean en alguna forma las teorías de Boussinesq o de Burmister para explicar estos efectos; pero la mayoría de métodos son semi-empíricos y se basan en una prueba de resistencia mecánica del suelo que ha sido utilizada con éxito en una determinada localidad o región; a partir de ella, se establece la correlación entre la prueba de resistencia y el comportamiento real de los pavimentos, para después desarrollar los nomogramas de proyecto. En general, los estudios del comportamiento de los pavimentos no se hacen en un tiempo considerable y adecuado para realizar la correlación correcta, esto es debido a la falta de continuidad en la mayoría de los programas sobre estudios de pavimentos.

Por lo que la Asociación Americana de Carreteras Estatales Oficiales (AASHO) decidió realizar un camino de prueba,-

que correlacionara la teoría existente y la experiencia adquirida con la práctica, con el funcionamiento real de los pavimentos diseñados y que en el camino de prueba AASHO fueron llevados a la falla o hasta una aplicación de un millón de ejes de los que circulaban en ese circuito, y así complementar o modificar la tecnología empleada para el diseño y construcción de este camino, para que los resultados obtenidos en costo y funcionalidad de los pavimentos sea el óptimo.

Con los resultados que se obtuvieron a partir de este camino de prueba, se desarrollaron los nomogramas para el diseño de pavimentos, que cada país o región donde sean diseñados puede emplear tomando en cuenta las limitaciones propias de un camino de prueba donde las condiciones de construcción y calidad de materiales se pueden considerar las mejores, además que las condiciones climáticas pueden variar considerablemente.

En la segunda mitad de la década de los 40s, ingenieros mexicanos dedicados a la construcción y el estudio de los pavimentos, dirigidos por el Ing. Rodrigo Padrón Llaca, desarrollaron un método para el diseño de pavimentos flexibles basado en una prueba estática en donde los especímenes son compactados a diferentes pesos volumétricos y distintas humedades, de tal manera que el proyectista puede hacer los especímenes que crea necesario para conocer el comportamiento del suelo que está estudiando, incluyendo las condiciones críticas que se presentan en la realidad. Este método de diseño fue pra

sentado en el Congreso Panamericano de Carreteras de Lima Perú en 1951 y se le denominó Porter Modificada (Ref 4 y 6).

La tecnología para el proyecto de pavimentos flexibles (Porter Modificada) ha dado como resultado pavimentos funcionales y más económicos que los construidos en otros lugares (Ref 6); considerando las limitaciones de los nomogramas AASHO, y los resultados satisfactorios de la tecnología Porter Modificada, el objetivo principal de esta tesis será establecer un rango de valores en el cual las dos tecnologías den resultados similares y por lo tanto, adecuar el nomograma AASHO para adaptarlo a las necesidades actuales y futuras de las carreteras que se construyan en México.

CAPITULO I

Descripción del tramo de Prueba AASHO construido en Ottawa Illinois (1960)

En el camino de prueba AASHO se construyeron 468 secciones diferentes de pavimento flexible, que se llevaron a la falla o hasta un millón de aplicaciones de los diferentes tipos de los ejes de prueba.

Estas secciones de prueba fueron construidas sobre terracerías de una calidad constante, una arcilla de baja plasticidad (CL) que en la escala de soporte del suelo se le dio un valor de 3 y cuyo valor crítico correspondiente es 2.8 - - (Porter estándar).

Se utilizaron las capas de: superficie de rodamiento (carpeta asfáltica), base y sub-base. Los espesores con los que respectivamente fueron construidos variaron en este rango: carpeta de concreto asfáltico de 2.5 a 15.0 cm, las bases se construyeron de roca triturada (caliza dolomítica) y sus espesores variaron entre 0 y 22.5 cm, las sub-bases fueron -- construidas de grava-arena procedente de banco con espesores variables entre 0 y 40 cm.

Se emplearon diez tipos de vehículos con las siguientes cargas por eje:

- a) Ejes sencillos: 2 000, 6 000, 12 000, 18 000, - -
22 400 y 30 000 libras.
- b) Ejes tándem: 24 000, 32 000, 40 000 y 48 000 libras

En un determinado carril de prueba siempre circulaba el mismo tipo de vehículo. Además el mismo diseño estructural se estudió simultáneamente bajo la acción de diferentes ejes, sencillo o tándem, para lo cual se repetían estructuraciones idénticas en carriles diferentes.

En la época de invierno se tuvieron períodos de congelación, seguidos de deshielo en la primavera siguiente.

La sección más débil correspondió a una carpeta de -- concreto asfáltico de 2.5 cm de espesor colocada directamente sobre la arcilla de baja plasticidad y fue sometida a un tránsito de vehículos ligeros. La sección más fuerte fue construída con una carpeta de concreto asfáltico de 15 cm de espesor, colocada sobre una base de roca triturada de 22.5 cm de espesor apoyada en una sub-base de 40 cm, esta sección se sujetó a tránsito pesado.

Entre lo más notable de mencionarse en este capítulo, se encontró que en el circuito No. 2 , una carpeta asfáltica - delgada colocada directamente sobre la arcilla de baja plasticidad tuvo un mejor funcionamiento y soportó un mayor número de cubrimientos (viajes) antes de fallar, que el mismo espesor - de carpeta asfáltica colocada sobre una capa de grava, aunque la arcilla tenía un bajo CER (Valor Relativo de Soporte) y se consideraba como un material inadecuado. Además en el circuito no. 5 las secciones 457, 458 467 y 468 también mostraron - que la falla en el pavimento fue debida a la base de grava y_

falló igualmente con un espesor de 37.5 cm así como con un espesor de 12.4 cm.

A este respecto, la tecnología mexicana ha demostrado que cuando una carpeta asfáltica es de un espesor mínimo, es necesario que la base tenga el suficiente aglutinamiento (valor cementante) para que la carpeta no se agriete y falle.

Con los datos anteriores se tiene una idea clara de los elementos constitutivos del camino de prueba AASHO y se puede realizar en los capítulos posteriores el análisis del método de diseño AASHO y las posibles correlaciones que tenga con las tecnologías de pavimentos existentes, fundamentalmente con la tecnología mexicana para el proyecto de pavimentos flexibles (Porter Modificada).

Conclusiones del tramo de prueba AASHO

El objetivo principal del estudio de el pavimento en el camino de prueba AASHO, consistió en establecer las relaciones significativas entre el número de repeticiones de carga -- por eje con diferente intensidad y disposición, con el comportamiento de diferentes espesores de pavimento asfáltico, pavimento de concreto simple y reforzado de cemento portland, uniformemente diseñados y construidos, sobre diferentes espesores de bases y sub-bases, sobre un suelo de cimentación de características conocidas.

El método AASHO de diseño, desarrollado a partir del camino de prueba, no es un intento por reemplazar los procedimientos de diseño que son usados satisfactoriamente, sino mostrar las relaciones existentes entre el comportamiento de los espesores estructurales y las cargas impuestas por el tránsito pero considerando que se utilizaron los materiales de la mejor calidad para la construcción del tramo de prueba, un sólo suelo de cimentación y un mismo medio ambiente, un procedimiento acelerado para la acumulación del tránsito, y tránsito acumulado en cada sección de prueba por la operación de vehículos con idénticas cargas y configuración de ejes, en lugar del tránsito mezclado.

Por estas razones, es necesario analizar todas las variables que intervienen en el diseño de los pavimentos, aplicando la experiencia y el criterio del ingeniero proyectista -

para que los resultados en costo y funcionalidad de los pavimentos empleando este método de diseño AASHO sean los óptimos. El método de diseño AASHO se debe retroalimentar en función de los resultados y la experiencia adquirida a partir de los pavimentos diseñados con este método.

Análisis de las variables que intervinieron en el método de diseño AASHO:

1.- El método de diseño AASHO se fundamentó en los resultados de un camino de prueba realizado en un mismo medio -- ambiente, materiales y condiciones de construcción. Estas condiciones pueden variar considerablemente en otros lugares donde se construyan pavimentos, por lo que el juicio ingenieril, y algunas otras consideraciones teóricas, fueron utilizadas para extrapolar los resultados a otras condiciones.

2.- Los métodos para convertir el tránsito mezclado a un número de ejes equivalentes son numerosos, y pueden resultar diferencias en los valores de predicción. Para minimizar la oportunidad de errores serios, el método proporcionado para este fin por la AASHO para obtener la máxima exactitud con los datos de tránsito existentes se sugiere para su uso inmediato. Las conclusiones adicionales son:

a) Los datos de cargas medidas en el formato general de las cartas medidoras de cargas FHWA W-4 serán usadas para cada uno de los grupos de carga.

b) Tomando en cuenta que el tránsito es un factor crí-

tico en el diseño, es más confiable obtener los datos del tránsito a través de un amplio muestreo del mismo, en el sistema de carreteras estatales. El modo más deseable de realizarlo es instalando más estaciones medidoras de carga para la colección anual de datos.

c) Los factores de equivalencia usados para convertir el tránsito mezclado deberían desarrollarse dando la consideración del efecto de los espesores del pavimento y anticipando el servicio terminal.

3.- Los procedimientos para establecer el valor de soporte del suelo para el diseño de pavimentos flexibles varía desde las sofisticadas pruebas triaxiales hasta el juicio ingenieril. Aunque la escala original de soporte del suelo fue válida para solamente un punto, $S=3$ (o posiblemente dos, $S=10$).- fue posible a través de la teoría mostrar que el resto de la escala es razonablemente sensata.

4.- Para establecer los efectos de la variación en las condiciones del medio ambiente o regionales, es necesario desarrollar métodos superiores a los actuales. Existen métodos para establecer estos efectos basados en el juicio ingenieril y en las mediciones de los parámetros críticos del medio ambiente. Las condiciones proporcionadas para diferenciar el funcionamiento de secciones equivalentes bajo condiciones de medio ambiente diferentes, son insuficientes. Es necesario un programa a nivel estatal y nacional basado en estudios sistemáticos.

para establecer esta diferencia.

5.- El coeficiente estructural de capa para determinados materiales de pavimento no es constante. Los resultados -- del camino de prueba AASHO mostraron que el coeficiente estructural de capa de la superficie de rodamiento puede variar considerablemente dependiendo de la calidad del material sobre el cual se coloque, y este valor puede ser hasta ocho veces más -- alto. Asimismo esta variación puede ser atribuible a diferencias de temperatura. Otras variables que deben ser consideradas para establecer el coeficiente estructural de capa son:

a) La magnitud de carga por eje y el número de repeticiones de cada uno.

b) El espesor de cada uno de los componentes del pavimento.

c) Las propiedades de los materiales de cada uno de -- los componentes del pavimento, incluyendo el suelo de cimentación.

d) El medio ambiente, incluyendo temperatura, humedad, congelamiento y los ciclos de cambio en cada uno de ellos.

e) La posición relativa y la profundidad de la capa en la estructura del pavimento.

Finalmente es importante destacar la necesidad de estudios adicionales en el área de pavimentos para complementar -- las tecnologías actuales y convertirlas en métodos que sigan -- siendo funcionales para las nuevas necesidades que se presen--

tan con el incremento de cargas e intensidad del tránsito, sin descuidar el importantísimo aspecto económico, que es fundamental en los países en vías de desarrollo.

CAPITULO III

Aplicaciones del tramo de prueba AASHO

Con los datos obtenidos a partir del camino de prueba AASHO, se desarrolló un método de diseño para calcular los espesores totales de la estructura del pavimento, así como los espesores de cada una de las capas componentes; además de que presentó un nuevo enfoque de las variables utilizadas en el diseño de los pavimentos flexibles, de tal manera que las tecnologías existentes pueden emplear estos resultados para incorporarlos a su propio método de diseño, o bien si se considera que los resultados provenientes del nomograma AASHO son similares a los de la tecnología empleada, se puede sustituir el método de diseño utilizado, por la tecnología resultante del camino de prueba AASHO. Las variables aplicables a otros métodos de diseño a que se refiere este capítulo, deben ser analizadas ampliamente, dichas variables son:

- a) Correlación del Valor de Soporte del Suelo
- b) Tránsito equivalente a eje sencillo de 18 000 libras (8.2 ton).
- c) Índice de Servicio.
- d) Factor Regional
- e) Número Estructural (NE)

a) Correlación del valor de soporte del suelo.- La ecuación de diseño desarrollada a partir de los resultados del camino de prueba AASHO, es válida para un sólo valor de soporte del suelo, representado por el suelo de cimentación del ca

mino de prueba AASHO; con el objeto de hacer el procedimiento de diseño aplicable a otras condiciones del suelo de cimentación, es necesario suponer una escala de valores de soporte del suelo que represente la variedad de suelos de cimentación que pueden ser encontrados en otros sitios.

Para desarrollar la escala de valores de soporte del suelo mencionada, al suelo de cimentación del camino de prueba se le asignó un valor de soporte de 3.0; se obtuvo un segundo punto mediante el estudio del comportamiento de las estructuras de pavimento colocadas sobre un agregado de base conocido, el cual fue lo suficientemente grueso para minimizar los efectos negativos del suelo de cimentación del camino de prueba, examinando el comportamiento de varias secciones de prueba en el circuito, sujetas a un tránsito de vehículos con cargas por eje sencillo de 18 000 libras (8.2 ton), indicaron que 4 1/2 pulg (114 mm) de carpeta de concreto asfáltico en un espesor substancial de base compuesto por roca triturada, transportó 1 000 aplicaciones de carga por eje sencillo de 18 000 libras por día o 7 300 000 para un período de diseño de 20 años. Mediante la proyección de una línea a partir del número estructural 1.98 (4.5 X 0.44) (espesor de la carpeta multiplicado por el coeficiente de capa que corresponde a el concreto asfáltico) Ref. 1, a través de 7 300 000 aplicaciones sobre la escala de diseño del tránsito, se estableció el segundo punto sobre la escala de soporte del suelo; a este -

punto se le asigno el valor de 10.0 y representa el valor de soporte del suelo para el material de base de roca triturada, empleado en el camino de prueba. Para establecer puntos intermedios, se supone una escala lineal entre los puntos 3.0 y 10.0 de tal manera que:

$$\log W_{t18} = \log N'_{t18} + [f(S)] \quad (\text{Ec. III.1})$$

donde:

$$f(S) = K(S_i - S_o).$$

S_i = Valor de soporte del suelo para una condición "i".

S_o = Valor de soporte del suelo para las condiciones del camino de prueba.

N'_{t18} = Total de cargas aplicadas para las condiciones del camino de prueba.

W_{t18} = Aplicaciones de cargas totales para condiciones "i".

K = Constante.

La Ec. III.1 también puede escribirse así:

$$10^{K(S_i - S_o)} = W_{t18} / N'_{t18} \quad (\text{Ec III.2})$$

Por lo tanto, para las condiciones del camino de prueba

ba AASHO:

<u>Número estructural (NE)</u>	<u>Valor de Soporte (S)</u>	<u>W_{t18} (diario)</u>
1.98	10	1 000
1.98	3	2.5

La solución de la Ec. III.2 con los datos anteriores

es:

$$10^{K(10 - 3)} = 1\ 000/2.5$$

$$K = 0.372$$

Se define entonces la influencia del soporte del suelo mediante la Ec:

$$\log W_{t18} = 0.372 (S_1 - 3.0) + \log N'_{t18} \quad (\text{Ec III.3})$$

La razonabilidad de esta escala ha sido checada a través de computaciones teóricas, también ha sido revisada con su aplicación en los procedimientos de diseño.

En la tabla III.1 se muestra la correlación que existe entre la escala del valor de soporte del suelo con otras pruebas de laboratorio.

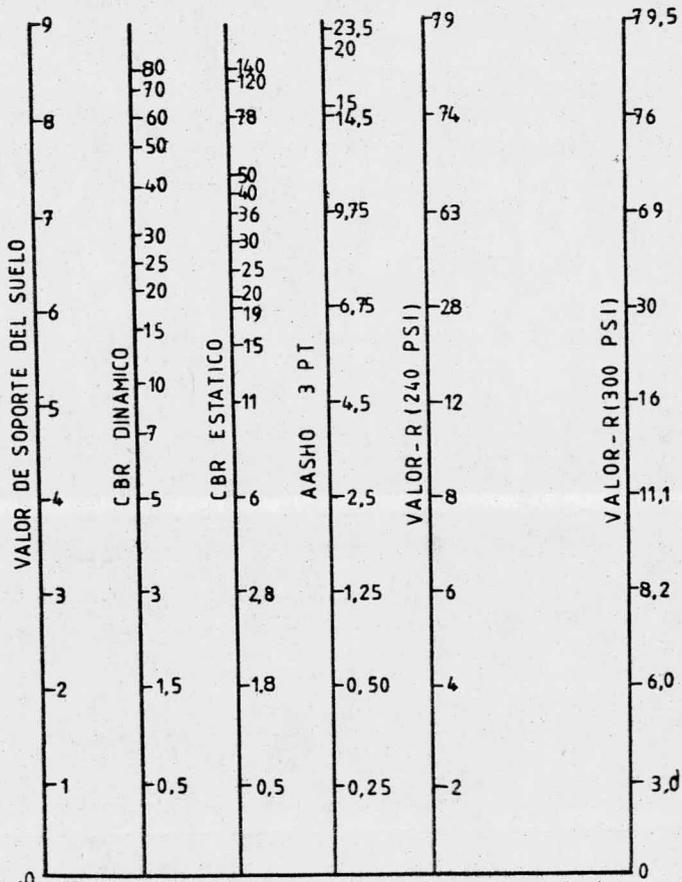


Tabla III.1.- Correlación del Valor de Soporte del Suelo con otras pruebas de laboratorio.

b) Tránsito equivalente a eje sencillo de 18 000 libras (8.2 ton). - Para la aplicación del método de diseño - AASHO, el tránsito mezclado debe ser convertido a un número de cargas de eje sencillo equivalente de 18 kips (8.2 ton). - El procedimiento para llevar a cabo esta conversión incluye:

1.- Desarrollo de los factores de carga de tránsito equivalente.

2.- Conversión del tránsito mezclado a las aplicaciones de carga por eje sencillo equivalente de 18 kips.

3.- Consideraciones de la distribución por carril.

Para expresar las variaciones de carga por eje en términos de un común denominador, es necesario desarrollar los factores de equivalencia del tránsito; estos factores, cuando son multiplicados por el número de cargas por eje dentro de un nivel de peso dado, da el número de aplicaciones de carga por eje sencillo de 18 kips el cual tiene un efecto equivalente sobre el funcionamiento de la estructura del pavimento. La ecuación resultante para eje sencillo es:

$$\log W_{tx}/W_{t18} = 4.79 \log (18+1) - 4.79 \log (L_x+1) + G_t/\beta_x - G_t/\beta_{18} \quad (\text{Ec. III.4})$$

y para eje tandem:

$$\log W_{tx}/W_{t18} = 4.79 \log (18+1) - 4.79 \log (L_x+2) + 4.33 \log 2 + G_t/\beta_x - G_t/\beta_{18} \quad (\text{Ec. III.5}).$$

en donde:

G_t = es una función (el logaritmo) de la razón de pérdida

en servicio en un tiempo t sobre la pérdida potencial tomada en un punto donde $p_t = 1.5$.

La razón de W_{tx} a W_{t18} nos da las relaciones entre cualquier carga de eje, X , sea sencillo o tándem; con la carga por eje sencillo equivalente de 18 kips. La razón es definida como un factor de equivalencia, y es evaluada mediante la solución de las ecuaciones para eje sencillo y para eje tándem, respectivamente, para cualquier valor de X ; porque el término es una función del número estructural NE así como L_x , el factor de equivalencia varía en el NE. Los factores de equivalencia para un rango amplio de cargas por eje (sencillo o tándem) son resumidos en la tabla III.2

La predicción del tránsito para propósitos de diseño debe ser en realidad una información a partir del tránsito pasado modificado por los factores de crecimiento u otros cambios esperados. La forma más conveniente para acumular esta información del tránsito pasado es la carta medidora de cargas de la Administración Federal de Carreteras W4; la cual es una tabulación del número de ejes observado dentro de una serie de grupos de cargas por eje, generalmente con un intervalo de 2 000 lb (0.9 ton). Estas tabulaciones son una forma conveniente de conversión, porque el número de ejes en cada uno de los grupos de carga puede ser multiplicado por el factor de equivalencia de tránsito, apropiado para proporcionar el W_{t18} para cada uno de los grupos de carga. Esto puede ser

realizado como sigue:

$$W_1 = N_1 \cdot e_1 = N_t \cdot P_1 \cdot e_1$$

$$W_2 = N_2 \cdot e_2 = N_t \cdot P_2 \cdot e_2$$

$$W_i = N_i \cdot e_i = N_t \cdot P_i \cdot e_i$$

$$W_n = N_n \cdot e_n = N_t \cdot P_n \cdot e_n$$

donde:

W_i = Carga equivalente de eje sencillo de 18 kips para un grupo de carga i .

N_i = Número de ejes esperados para un grupo i .

N_t = Número total de ejes.

P_i = Por ciento de ejes en el grupo de carga i .

e_i = Factor de tránsito equivalente para el grupo de carga i .

El número de cargas de ejes equivalentes para todos los grupos de ejes es entonces resumido para dar un número representativo del tránsito mezclado:

$$W_{t18} = W_1 + W_2 \dots + W_i \dots + W_n$$

$$\circ \quad W_{t18} = \sum_{i=1}^n W_i$$

$$\circ \quad W_{t18} = N_t \sum_{i=1}^n P_i e_i \quad (\text{Ec. III.6})$$

Como se dijo anteriormente, las ecuaciones para eje sencillo y tándem son usadas para computar los factores de equivalencia del tránsito, estos factores son sin embargo, una función del número estructural NE. Por lo tanto, para llegar al valor de diseño W_{t18} es necesario suponer un valor

de diseño W_{t18} , es necesario suponer un valor del número estructural, y entonces resolver la Ec. III.6. Para efectos de cálculo se puede emplear un número estructural de 3.0 y determinar los factores de equivalencia para un eje sencillo de 18 kips (8.2 ton), pero el error resultante en el número estructural NE no es significativo. Cuando los resultados -- más exactos son deseados en el compute y el NE es apreciablemente diferente, del valor calculado, un nuevo valor será su puesto, y el número de tránsito de diseño (W_{t18}) recomputado con el número estructural NE determinado para el nuevo W_{t18} . Este procedimiento será continuado hasta que los valores supuestos y computados del NE sean tan cercanos como se desea.

El número de cargas por eje equivalente desarrolladas utilizando la Ec. III.6 representa el tránsito equivalente total para todos los carriles y en ambas direcciones del recorrido. Este número debe ser distribuido con los carriles y en la dirección para propósitos de diseño. La distribución direccional es generalmente hecha mediante la asignación del 50% del tránsito para cada dirección, se pueden realizar consideraciones especiales para garantizar otras distribuciones. Revisando la distribución por carril, la mayoría de los Estados asignan el 100% del tránsito en cada una de las direcciones para el carril de diseño. Algunos Estados han desarrollado factores de distribución por carril para facilitar el cálculo de la distribución en multicarriles. El rango de facto-

Eje sencillo, $p_t = 2.0$

Carga por eje		NE, Número estructural					
Kips	kN	1	2	3	4	5	6
2	8.9	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	17.8	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
6	26.7	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
8	35.6	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
10	44.5	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08
12	53.4	0.16	0.18	0.19	0.18	0.17	0.17
14	62.3	0.32	0.34	0.35	0.35	0.34	0.33
16	71.2	0.59	0.60	0.61	0.61	0.60	0.60
18	80.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	89.1	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.60
22	97.9	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
24	106.8	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
26	115.7	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
28	124.6	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
30	133.4	10.38	10.03	9.24	8.65	8.73	9.17
32	142.3	14.00	13.51	12.37	11.46	11.48	12.07
34	151.2	18.55	17.87	16.33	14.97	14.87	15.63
36	160.1	24.20	23.30	21.16	19.28	19.02	19.93
38	169.0	31.14	29.95	27.12	24.55	24.03	25.10
40	177.9	39.57	38.02	34.34	30.92	30.04	31.25

Eje tándem, $p_t = 2.0$

Carga por eje		NE, Número estructural					
Kips	kN	1	2	3	4	5	6
10	44.5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
12	53.4	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
14	62.3	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
16	71.2	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
18	80.1	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07
20	89.0	0.10	0.12	0.12	0.12	0.11	0.10
22	97.9	0.16	0.17	0.18	0.17	0.16	0.16
24	106.8	0.23	0.24	0.26	0.25	0.24	0.23
26	115.7	0.32	0.34	0.36	0.35	0.34	0.33
28	124.6	0.45	0.46	0.49	0.48	0.47	0.46
30	133.4	0.61	0.62	0.65	0.64	0.63	0.62
32	142.3	0.81	0.82	0.84	0.84	0.83	0.82
34	151.2	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.07
36	160.1	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	169.0	1.76	1.75	1.73	1.72	1.73	1.74
40	177.9	2.22	2.19	2.15	2.13	2.16	2.18
42	186.8	2.77	2.73	2.64	2.62	2.66	2.70
44	195.7	3.42	3.36	3.23	3.18	3.24	3.31
46	204.6	4.20	4.11	3.92	3.83	3.91	4.02
48	213.5	5.10	4.98	4.72	4.58	4.68	4.83

Eje sencillo, $p_t = 2.5$

Carga por eje		NE, Número estructural					
Kips	kN	1	2	3	4	5	6
2	8.9	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
4	17.8	0.003	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002
6	26.7	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
8	35.6	0.03	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03
10	44.5	0.08	0.10	0.12	0.10	0.09	0.08
12	53.4	0.17	0.20	0.23	0.21	0.19	0.18
14	62.3	0.33	0.36	0.40	0.39	0.36	0.34
16	71.2	0.59	0.61	0.65	0.65	0.62	0.61
18	80.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	89.0	1.61	1.57	1.49	1.47	1.51	1.55
22	97.9	2.48	2.38	2.17	2.09	2.18	2.30
24	106.8	3.69	3.49	3.09	2.89	3.03	3.27
26	115.7	5.33	4.99	4.31	3.91	4.09	4.48
28	124.6	7.49	6.98	5.90	5.21	5.39	5.98
30	133.4	10.31	9.55	7.94	6.83	6.97	7.79
32	142.3	13.90	12.82	10.52	8.85	8.88	9.95
34	151.2	18.41	16.94	13.74	11.34	11.18	12.51
36	160.1	24.02	22.04	17.73	14.38	13.93	15.50
38	169.0	30.90	28.30	22.61	18.06	17.20	18.98
40	177.9	39.26	35.89	28.51	22.50	21.08	23.04

Eje tándem, $p_t = 2.5$

Carga por eje		NE, Número estructural					
Kips	kN	1	2	3	4	5	6
10	44.5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
12	53.4	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
14	62.3	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02
16	71.2	0.04	0.07	0.07	0.06	0.05	0.04
18	80.1	0.07	0.10	0.11	0.09	0.08	0.07
20	89.0	0.11	0.14	0.16	0.14	0.12	0.11
22	97.9	0.16	0.20	0.23	0.21	0.18	0.17
24	106.8	0.23	0.27	0.31	0.29	0.26	0.24
26	115.7	0.33	0.37	0.42	0.40	0.36	0.34
28	124.6	0.45	0.49	0.55	0.53	0.50	0.47
30	133.4	0.61	0.65	0.70	0.70	0.66	0.63
32	142.3	0.81	0.84	0.89	0.89	0.86	0.83
34	151.2	1.06	1.08	1.11	1.11	1.09	1.08
36	160.1	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	169.0	1.75	1.73	1.69	1.68	1.70	1.73
40	177.9	2.21	2.16	2.06	2.03	2.08	2.14
42	186.8	2.76	2.67	2.49	2.43	2.51	2.61
44	195.7	3.41	3.27	2.99	2.88	3.00	3.16
46	204.6	4.18	3.98	3.58	3.40	3.55	3.79
48	213.5	5.08	4.80	4.25	3.98	4.17	4.49

Tabla III.2.- Factores de equivalencia de tránsito para pavimentos flexibles

res usados es mostrado a continuación:

Factores de Distribución por Carril para Caminos

Multicarriles

Número de carriles en ambas direcciones	Por ciento de W_{t18} en el carril de diseño
2	100
4	80 - 100
6	60 - 80

Si en el carril i los factores de distribución direccional son utilizados y los pavimentos son diseñados sobre la base de una distribución de tránsito, se darán las consideraciones para el uso de las secciones transversales variables. Las secciones estructurales más fuertes se harían en los carriles exteriores cuando se garantice sobre la base de un análisis de la distribución por carril.

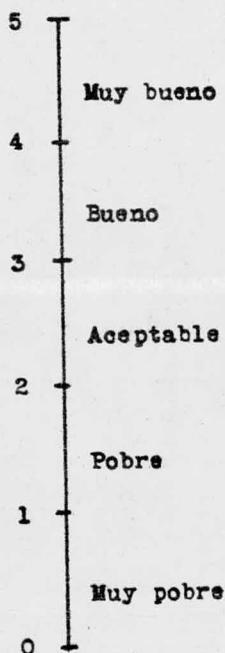
c) Índice de Servicio (Estado Estructural).

La utilidad de un pavimento es definida como la capacidad para dar servicio a un gran volumen de automoviles y camiones circulando a una velocidad alta. En el camino de prueba AASHO, se desarrolló un procedimiento para el período de vida útil del pavimento. Este procedimiento se refiere a la evaluación del servicio presente del pavimento, y se basó en la capacidad individual de un grupo selecto de hombres con amplia experiencia en todos los aspectos de la Ingeniería de Vías Terrestres, así como los usuarios de las carreteras. Una

escala con un rango de 0 a 5 fue establecida para el índice de servicio presente, con un valor de 5 en el índice de servicio más alto, y 0 como el más bajo. También se desarrolló un procedimiento para predecir la escala de servicio presente -- con la combinación de una serie de medidas físicas del pavimento. A esta combinación de valores se le denominó Índice de Servicio Presente.

Con el fin de desarrollar las ecuaciones del diseño del camino de prueba AASHO, fue necesario establecer las relaciones entre el comportamiento y el diseño estructural del pavimento, relacionando el comportamiento con la capacidad de satisfacer el Servicio de Tránsito sobre un período de tiempo. El comportamiento del camino de prueba pavimentado AASHO fue descrito en términos del Índice de Servicio en el tiempo en que se terminó su construcción y algún tiempo posterior a la misma. Este concepto servicio-comportamiento es la filosofía básica del método de diseño y los pavimentos pueden ser diseñados para el nivel de servicio deseado en el fin del período de análisis del tránsito seleccionado o después de la exposición de un volumen de tránsito total específico. La selección del Índice de Servicio final (p_t) está basado en el índice -- más bajo que sería tolerado antes de que la re-encarpetación o reconstrucción sean necesarios, un índice de 2.5 se sugiere como una guía para el diseño de carreteras con mayores volu-

menes de tránsito, y 2.0 para carreteras con volumen de tránsito menor. Para caminos con menores volúmenes de tránsito, - donde las consideraciones económicas dicten que el desembolso del capital inicial sea conservado al mínimo, se sugiere que_ estas consideraciones sean acompañadas de la reducción del análisis de los períodos de tránsito o el volumen total del -- tránsito en lugar que el diseño po menor que 2.0



Escala para la evaluación del Índice de Servicio Presente.

d) Factor Regional.- El factor regional fue incluido en la ecuación de este método de diseño para hacerlo aplicable a el diseño de pavimentos en áreas con climas y condiciones perjudiciales diferentes a las que prevalecieron en el sitio donde se construyó el camino de prueba. El ajuste es hecho por medio de una escala separada para modificar el número estructural.

Generalmente se reconoce que cuando las condiciones climáticas son adversas, tales como un período de baja de resistencia de los materiales del suelo de cimentación, el cual puede ocurrir durante el deshielo de primavera, el tránsito le causará un gran daño a el pavimento, mucho mayor que cuando las condiciones son más favorables. Esta variación en razón de la reducción en servicio de acuerdo con la estación del año ha sido promediada por el camino de prueba AASHO en un período para llegar a un factor regional aproximado. Los valores por estación varían entre 0.1 y 4.8 con un valor anual del factor regional de alrededor de 1.0. Correspondientes a el valor más bajo aplicable a ambos, el de la congelación sólida y las condiciones relativamente secas del suelo de cimentación del camino, cuando la razón de pérdida de servicio fue muy bajo y a los valores más altos aplicables a las condiciones primaverales en el lugar del camino de prueba AASHO.

En la actualidad no existe una forma para determinar directamente el factor regional para otras condiciones y difg

rentes lugares, podría estimarse como fueron las condiciones para el camino de prueba AASHO, por el análisis de la duración de ciertas condiciones para un año típico. Basados en la información del tramo de prueba AASHO, los valores que pueden usarse como guía para tales análisis son:

El material del suelo de cimentación del camino congelado a una profundidad de 5" (130 mm) o más 0.2 a 1.0

Los materiales del suelo de cimentación del camino secos, en verano y otoño 0.3 a 1.5

En los materiales del suelo de cimentación del camino húmedo en el deshielo de primavera 4.0 a 5.0

Se han empleado muchos otros procedimientos para determinar el factor regional, un estudio de los 50 Estados indicó que para la asignación de un factor regional, se utilizó uno o más de los siguientes criterios:

- 1.- Topografía
- 2.- Similitud de locación con el tramo de prueba.
- 3.- Lluvia.
- 4.- Penetración de la helada.
- 5.- Temperatura.
- 6.- Tabla de zonas húmedas.
- 7.- Tipo de suelo de cimentación
- 8.- Juicio ingenieril
- 9.- Facilidad del tipo de carretera.
- 10.- Drenaje subterráneo.

Existen otras condiciones aparte de las relacionadas, que pueden requerir ser consideradas para establecer el Factor Regional, tales como:

- 1.- Número de ciclos anuales de congelación-deshielo.
- 2.- Pendientes escarpadas con un gran volumen de tránsito pesado.
- 3.- Areas de concentración de movimiento, de cambio de dirección y altos.

En general, el factor regional no debería de exceder de alrededor de 4.0, o ser menor de 0.5 para las condiciones en los Estados Unidos. El factor regional puede no ser ajustado para las condiciones especiales, tales como una condición de congelación seria, u otros problemas locales.

e) El Número Estructural (NE).- El número estructural determinado por este procedimiento de diseño debe ser convertido a el espesor equivalente de carpeta, base y sub-base, mediante la asignación de un coeficiente de capa (a_1, a_2, a_3) - para representar el esfuerzo relativo del material actualmente usado para cada capa. En el análisis del camino de prueba AASHO se establecen tales coeficientes de capa para los materiales usados en particular (carpeta de concreto asfáltico, base de roca triturada y sub-base de grava-arena), y para el diseño específico, construcciones normales, condiciones perjudiciales y exposición al tránsito representado por la prueba. Las agencias usuarias deben tener especial cuidado en

la selección de los coeficientes aplicables.

Desarrollo de los coeficientes estructurales de capa:

Uno de los principales objetivos del camino de prueba AASHO fue determinar las relaciones significativas entre el número de repeticiones de una carga por eje sencillo especificado de diferente magnitud y adaptarlo a el comportamiento de los diferentes espesores de bases y sub-bases asentados sobre un suelo de cimentación de características conocidas, para cumplir con este propósito, se organizó un diseño factorial para el estudio de los efectos de las diferentes cargas en unas estructuras de pavimento similar y en otras diferentes. Además, para el primer diseño factorial, se incluyeron dos experimentos adicionales especiales en otros circuitos; el primero incluía un estudio de los hombros del pavimento, el segundo un estudio de los tipos del material de base.

En el estudio de la base, fueron usados cuatro diferentes tipos de material: roca triturada, grava, grava tratada con cemento y grava tratada con asfalto. Basados en el resultado de este estudio, el comité de diseño AASHO estableció coeficientes estructurales de capa provisionales, para los diferentes tipos de materiales usados. Los coeficientes para otros materiales de base fueron estimados del resultado del estudio de base especial de el camino de prueba AASHO o a través de la ingeniería y factores de juicio.

Coeficientes Estructurales de Capa Propuestos por el Comité
de Diseño AASHO, Octubre 12, 1961.

Componente del Pavimento	Coeficiente
Superficie de rodamiento	
Mezcla en el lugar (baja estabilidad)	0.20
Mezcla en planta (alta estabilidad)	0.44
Arena asfáltica	0.40
Capa de Base	
Grava arena	0.07
Roca triturada	0.14
Tratamiento con cemento (no suelo-cemento)	
Resistencia a la compresión a 7 días	
650 lb/in ² (116 kg/cm ²)	0.23
400 a 650 lb/in ² (72 a 116 kg/cm ²)	0.20
400 lb/in ² o menos (72 kg/cm ² o menos)	0.15
Tratamiento con asfalto.	
Amplia granulometría (gruesa)	0.34
Arena asfáltica	0.30
Tratamiento con cal	0.15 - 0.30
Capa de Sub-base	
Grava-arena	0.11
Arena o arena-arcillosa	0.05 - 0.10

El concepto del uso de estos coeficientes en el diseño es expresado por la ecuación general:

$$NE = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3$$

Donde:

a_1 , a_2 , a_3 = Coeficientes de resistencia relativa

D_1 = Espesor de la capa de superficie de rodamiento (carpeta asfáltica) en pulgadas.

D_2 = Espesor de la capa de base, pulgadas

D_3 = Espesor de la sub-base, en pulgadas

Estos valores provisionales, establecidos en ese tiempo no necesariamente son aplicables a todos los materiales de pavimento y medio ambientes, y serán verificados por las agencias individuales de diseño antes de adoptarlos para su propio uso. Deben darse consideraciones especiales para establecer los coeficientes en los cuales varíe el tipo de material o sus propiedades, y su posición en la estructura del pavimento, se está haciendo un considerable esfuerzo por las agencias de diseño hacia la mejor definición y refinamiento de los coeficientes estructurales de capa.

El análisis de las 5 variables desarrolladas en este capítulo, nos muestra los aspectos fundamentales que constituyen el método de diseño AASHO, y asimismo nos enseña las aplicaciones que pueden tener con otros métodos de diseño, ya sea que se integren a dichos métodos en caso de no haberlos empleado anteriormente, o simplemente complementar o modificarlos cuando si se usen.

CAPITULO IV
METODO DE DISEÑO AASHO PARA ESTRUCTURAS
DE PAVIMENTO FLEXIBLE BASADO EN EL TRA-
MO DE PRUEBA DE OTTAWA ILLINOIS

Este procedimiento de diseño se fundamentó en los resultados del camino de prueba AASHO y se suplementó con la evaluación de la teoría y los procedimientos de diseño existentes. Así mismo el camino de prueba representó el desarrollo - más comprensivo de las relaciones entre el comportamiento de los espesores estructurales y las cargas impuestas por el - - tránsito, los resultados son limitados por las dimensiones de la prueba y las condiciones climáticas y de construcción bajo las cuales fue conducida; también es importante mencionar el procedimiento acelerado para la acumulación del tránsito, que consistió en la operación de vehículos con idénticas cargas y configuración de ejes, en lugar del tránsito mezclado. Por lo que el método de diseño no es un intento para reemplazar los procedimientos de diseño existentes que son usados satisfactoriamente.

Las variables que intervinieron en el método de diseño son las siguientes:

- a) Valor de soporte del suelo (S)
- b) Tránsito equivalente a eje sencillo de 18 000 lb -
(8.2 ton).
- c) Índice de Servicio
- d) Factor Regional (R)

e) Número Estructural (NE)

Estas variables y otros factores que intervinieron en el desarrollo de las ecuaciones del camino de prueba fueron tratados con amplitud en el capítulo III.

Desarrollo de los factores pertenecientes al diseño de estructuras de pavimento flexible:

1.- Desarrollo de las ecuaciones de diseño para el pavimento flexible.

La ecuación general del camino de prueba AASHO es:

$$G_t = \beta (\log W_t - \log \rho) \quad \text{Ec. IV.1}$$

Donde:

G_t = una función (el logaritmo) de la razón de pérdida en servicio en un tiempo t a la pérdida potencial tomada en un punto donde $p_t = 1.5$.

β = una función de diseño y cargas variables que influyen la forma de la curva $p - W$.

W_t = aplicaciones de carga por eje al fin del tiempo t

ρ = una función del diseño y cargas variables que denotan el número esperado de cargas por eje aplicadas para un índice de servicio de 1.5.

p_t = Índice de servicio al fin del tiempo t .

En el camino de prueba AASHO, los términos β y ρ en la Ec. IV.1 para la carga y las variables que intervienen en el diseño de los pavimentos flexibles son como sigue:

$$\beta = 0.40 + 0.081(L_1 + L_2)^{3.23} / (\overline{NE} + 1)^{5.19} L_2^{3.23} \quad \text{Ec. IV.2}$$

y:

$$\log \rho = 5.93 + 9.36 \log (\overline{NE} + 1) - 4.79 \log (L_1 + L_2) \\ + 4.33 \log L_2 \quad \text{Ec. IV.3}$$

donde:

L_1 = carga fija en un eje sencillo o en un eje tándem en kips.

L_2 = clave de eje (1 para eje sencillo y 2 para eje tándem)

NE = Número Estructural.

Apartir de las ecuaciones para β y ρ ambos contienen los términos L_1 , L_2 y \overline{NE} ; la solución de la ecuación IV.1 para el \overline{NE} incluye un proceso iterativo. La solución se simplifica si todos los factores de carga son expresados en términos de un común denominador. El común denominador usado en este método de diseño es una carga por eje sencillo de 18 000 lb (8.2 ton), y para estas condiciones $L_1 = 18$ kips (8.2 ton, $L_2 = 1$), la ecuación IV.2 se vuelve:

$$\beta = 0.40 + 0.081 (18 + 1)^{3.23} / (\overline{NE} + 1)^{5.19}$$

ó

$$\beta = 0.40 + 1094 / (\overline{NE} + 1)^{5.19}$$

y la ecuación Ec. I V. 3 se vuelve:

$$\log \rho = 5.93 + 9.36 \log (\overline{NE} + 1) - 4.79 \log (18 + 1) + 4.33 \log 1$$

$$\text{ó: } \log \rho = 9.36 \log (\overline{NE} + 1) - 0.20 \quad \text{Ec. IV.5}$$

Reescribiendo la ecuación (Ec. IV.1) como:

$$\log W_t = \log \rho + G_t/\beta \quad (\text{Ec. IV.6})$$

e insertando la ecuación (Ec. IV.4) y (Ec. IV.5) dentro de la ecuación (Ec. IV.6):

$$\log W_{t18} = 9.36 \log (\overline{NE} + 1) - 0.20 + G_t/0.40 + \frac{1094}{(\overline{NE} + 1)^{5.19}}$$

donde:

$$(\text{Ec. IV.7})$$

$$G_t = \log (4.2 - p_t/4.2 - 1.5)$$

W_{t18} = número de aplicaciones de carga por eje sencillo de 18 kips (8.2 ton) para un tiempo t .

La ecuación (Ec. IV.7) proporciona una base para desarrollar los nomogramas de diseño incluyendo los factores W_{t18} , \overline{NE} y p_t (con valores de 2.0 y 2.5 que son los usados en este procedimiento de diseño). No obstante, estos nomogramas únicamente serán aplicables al suelo y a las condiciones climáticas similares a las encontradas en el camino de prueba AASHO. Cada nomograma tendrá escalas para el total de cargas aplicadas (W_{t18}), para el número estructural (\overline{NE}) y para un sólo punto en una escala para soporte del suelo representativo de las condiciones del camino de prueba. (En el capítulo III se mostró como se puede interpolar la escala de soporte del suelo para otras condiciones diferentes a las del camino de prueba).

Para las variaciones de las condiciones climáticas, se acepta que el total de cargas aplicadas es una función inversa del factor regional de tal manera que:

$$W_{t18} = N_{t18} + (1/R)$$

o

$$\log W_{t18} = \log N_{t18} + \log (1/R)$$

donde:

N_{t18} = total de cargas pesadas aplicadas equivalentes

R = Factor Regional.

En general, estas son las ecuaciones que se utilizaron para desarrollar los nomogramas de la AASHO que se presentarán posteriormente en este mismo capítulo.

Tomando en cuenta que una estructura de pavimento es un sistema de capas diseñado para distribuir las cargas concentradas impuestas por el tránsito hacia las terracerías, la preparación de estas incluye generalmente en menor grado la compactación del suelo de cimentación del camino y también puede incluir otros medios para proporcionar el soporte óptimo a la estructura del pavimento.

El comportamiento de una estructura de pavimento esta directamente relacionado con las condiciones y propiedades físicas del suelo de cimentación del camino. El método AASHTO -- considera la suposición de que la mayor parte de los suelos pueden ser representados adecuadamente para el diseño del pavimento mediante el valor de soporte (S) para el pavimento flexible, el cual se compensará para suelos pobres mediante el incremento del espesor de la estructura del pavimento; no obstante, ciertos suelos, tales como aquellos que son excesivamente expansivos, resilentes, susceptibles a congelamiento, o altamente orgánicos requieren de un tratamiento especial para que proporcionen un comportamiento adecuado a el pavimento.

Otros problemas relativos a los suelos de cimentación de los caminos, es el soporte no uniforme que resulta de la amplia variedad en los tipos de suelo o condiciones; la densificación adicional (incremento del peso volumétrico seco) bajo el tránsito, de suelos que no son adecuadamente compacta-

dos durante su construcción; además de las dificultades constructivas particularmente las asociadas con la compactación de arenas poco cohesivas y húmedas, también los que presentan las arcillas de alta plasticidad.

Con estos problemas en mente, es recomendable que lo siguiente sea considerado durante el diseño y que se hagan -- las modificaciones necesarias a las especificaciones, cuando sean aplicables:

1.- El criterio básico para la compactación del suelo de cimentación del camino incluirá un requisito de densidad apropiado. Los procedimientos de inspección deben ser adecuados para asegurar que el peso específico requerido (PVSM) es obtenido durante su construcción.

2.- Los suelos que son excesivamente expansivos o con rebote elástico recibirán una consideración especial. Una solución es sustituir estos suelos con material seleccionado, con la profundidad suficiente para superar los efectos perjudiciales de la expansión o el rebote elástico.

Los suelos expansivos frecuentemente pueden ser mejorados mediante la compactación con contenidos de agua arriba de la óptima.

En algunos casos será más económico tratar la expansión o el rebote elástico de los suelos mediante la estabilización con una mezcla adecuada, como cal o cemento, o en su caso una membrana a prueba de agua para controlar los conteni

dos de humedad.

3.- En áreas sujetas a heladas, las capas de suelo -- susceptible a congelarse serán removidas y reemplazadas con material seleccionado no susceptible. Donde tales suelos sean demasiado extensos para removerlos económicamente, el tipo y el espesor necesario para tal medida debe determinarse en base a la experiencia local y los tipos de materiales económicamente disponibles.

4.- Los problemas con los suelos altamente orgánicos_ y los relacionados con su naturaleza altamente compresible, - son acentuados cuando los depósitos son extremadamente variables en propiedades y profundidad. Los depósitos locales o aquellos de una profundidad relativamente baja, resulta frecuentemente más económico excavar y reemplazarlo con un material seleccionado apropiado. Los problemas asociados con la - profundidad y depósitos más extensos, han sido aliviados mediante la colocación de terraplenes sobrecargados de preconsolidación, algunas veces con provisiones especiales para apresurar la expulsión del agua y acelerar la consolidación.

5.- Las provisiones especiales para los suelos variables y condiciones poco usuales pueden incluir: escarificación y recompactación; tratamiento de la capa superior del suelo - de cimentación del camino con una mezcla apropiada; sobre-ex_ cavando la sección en corte, y colocando una capa uniforme de material seleccionado en ambas áreas, de corte y terraplén; o

ajustando en el espesor de la sub-base, en transiciones de un tipo de suelo a otro, es decir, de una sección de corte a una sección de terraplén.

6.- Así mismo, el procedimiento de diseño está basado en la suposición de que se harán provisiones para el drenaje superficial y subterráneo, las situaciones poco usuales pueden requerir atención especial que se da al diseño y construcción del sistema de drenaje. El drenaje es particularmente importante en las regiones donde se encuentran flujos densos de agua (manantiales y escurrideros); donde las condiciones perjudiciales de la helada se presentan, o donde los suelos son susceptibles particularmente a la expansión o pérdida de resistencia con el incremento en el contenido de agua. El drenaje subterráneo especial puede incluir provisiones de capas adicionales de material permeable debajo del pavimento para interceptar y recolectar el agua. Una superficie especial de drenaje puede requerir facilidades tales como: diques, zanjas pavimentadas y cunetas.

7.- Los suelos poco cohesivos, presentan el problema de desplazarse bajo el equipo usado para construir el pavimento; los suelos arcillosos húmedos no pueden ser compactados con contenidos altos de agua porque se desplazan bajo los rodillos y requieren períodos de tiempo largos para secarse y tener un contenido de agua apropiado. Para resolver estos problemas de construcción se han tomado algunas medidas tales co

mo: mezcladas con otros suelos, agregando una mezcla apropiada a las arenas para darles cohesión, arcillas para apresurar el secado o aumentar su resistencia al corte; y cubriendo con una capa de material seleccionado más apropiado para actuar como una plataforma de trabajo para la construcción del pavimento.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y ESPECIFICACIONES

Sub-base.

La capa de sub-base es la porción de la estructura -- del pavimento flexible colocada entre el suelo de cimentación y la capa de base. Generalmente consiste en una capa compactada de material granular, puede ser estabilizada o sin estabilizar, o de una capa de suelo tratada con una mezcla adecuada. En adición a esta posición en el pavimento, generalmente se distingue del material de base, por la especificación menos estricta, requerida para su resistencia, plasticidad y granulometría; porque es obvio que la capa de sub-base debe ser de menor calidad que la capa de base y a su vez de una calidad superior a la del suelo de cimentación del camino, la sub-base frecuentemente es omitida si los suelos de cimentación del camino son de alta calidad.

Cuando los suelos de cimentación del camino son de baja calidad y el procedimiento de diseño indica la posibilidad de un espesor sustancial del pavimento, las alternativas de diseño serán preparadas para las secciones estructurales con

y sin sub-base. Se puede hacer la selección de una alternativa en base a la evaluación de los costos relativos del material apropiado para base y sub-base; porque los materiales de menor calidad pueden ser usados en las capas más bajas de una estructura de pavimento flexible, el uso de una sub-base es frecuentemente la solución más económica para la construcción de pavimentos sobre un suelo de baja calidad.

Debido a los muchos y diferentes tipos de materiales utilizados como sub-base, no se especifican los requisitos de calidad para este tipo de material utilizado en este procedimiento de diseño. No obstante, para el uso en este procedimiento de diseño se requiere emplear un coeficiente de capa (a_3), a fin de convertir el espesor actual al número estructural (NE).

Para que la sub-base tenga un mejor funcionamiento como una porción estructural del pavimento, se le pueden adicionar a esta capa funciones secundarias tales como:

- 1.- Prevenir la incrustación del suelo de cimentación del camino de una granulometría gruesa dentro de la capa de base, se deben especificar materiales de una granulometría relativamente gruesa si la sub-base servirá para este propósito.

- 2.- Para minimizar los efectos dañinos de la acción de la helada. Se deben especificar materiales que no son susceptibles a la acción de esta.

- 3.- Para ayudar a prevenir la acumulación de agua li-

bre dentro o abajo de la estructura del pavimento. Se debe especificar material de drenaje libre si la sub-base se utilizará para este propósito, y se deben hacer provisiones especiales para prevenir que se acumule el agua, de manera que se colecta y remueva el agua desde la sub-base.

4.- Proporcionar una plataforma de trabajo para el equipo de construcción.

CAPA DE BASE

La capa de base es la porción de la estructura del pavimento flexible inmediatamente abajo de la superficie de rodamiento; si se construye la capa de sub-base, sobre ésta, o si no es usada, directamente sobre el suelo de cimentación -- del camino. El comportamiento es en mayor parte como una porción estructural del pavimento; generalmente consiste de agregados, tales como roca triturada, escoria triturada, grava y arena triturada o sin triturar, o de la combinación de estos materiales. Pueden ser usados sin tratar o tratados con una mezcla estabilizante apropiada, tales como el cemento portland el asfalto o la cal. Generalmente las especificaciones para los materiales de la capa de base son más estrictas que para los materiales de sub-base, en los requisitos de resistencia, plasticidad y granulometría.

Cierta variación en graduación y calidad de los materiales de sub-base han sido usados en ciertas áreas con un comportamiento satisfactorio.

Una amplia variedad de materiales inadecuados para el uso como capa de base sin tratar, han proporcionado un comportamiento satisfactorio cuando se aprovechan mediante la adición de una mezcla estabilizante tal como cemento portland, -asfalto o cal. Para el uso de estos materiales se deben dar ciertas consideraciones, en particular cuando no existe facilidad económica, especialmente cuando los materiales adecuados sin tratar no se encuentran a corta distancia. Además de las ventajas económicas resultantes del empleo de agregados de bajo costo, es posible la reducción en el espesor total de la estructura del pavimento. En la tabla IV. 1 se proporciona una guía para establecer las especificaciones requeridas para estabilizar la capa de base, es necesario realizar un estudio cuidadoso para la selección del tipo y calidad de la mezcla que se usará para proporcionar un comportamiento satisfactorio y a la vez sea económico.

SUPERFICIE DE RODAMIENTO

La superficie de rodamiento de un pavimento flexible, consiste de una mezcla de agregados minerales y material bituminoso, colocada como la capa más superficial y generalmente construida sobre la capa de base, debe diseñarse para resistir los esfuerzos abrasivos del tránsito, para reducir la cantidad de agua superficial que penetre al pavimento, para proporcionar una superficie resistente a derrapadas que sea tersa y uniforme.

El buen éxito de la superficie de rodamiento depende

Tabla IV. 1.-

Algunas especificaciones típicas requeridas para estabilizar
la capa de Base.

Especificación	Tratamiento con cemento			Tratamiento con asfalto		Tratamiento con cal
	A	B	C	1	2	
% que pasa la malla						
mm						
63 (2 1/2")	100	100	100			
19.0 (3/4")	-	-	75-95			
4.75 (No. 4)	65-100	55-100	25-60			
2.00 (No. 10)	20-45	-	15-45			
0.425 (No. 40)	15-30	25-50	8-30			
0.075 (No. 200)	5-12	5-20	2-15			
Resistencia a la compresión	650-1000	300-650				
psi en 7 días	4.5-6.9MPa	2.1-4.5MPa				
Valor de Soporte del suelo (S)		8.0 mín			10.0 mín.	
Estabilidad						
Estabilómetro Hveem				35 mín.	25 mín	
Hubbard-Field				1200 mín.	1000mín.	
Estabilidad-marshall				750 mín.	500mín.	
Flujo-marshall				16 máx.	20máx.	
Indice de plasticidad						
	12 máx.			6 máx	6 máx.	6 máx.

en obtener una mezcla con granulometría óptima de agregados y porcentaje de aglutinante bituminoso para ser durable y resistente a las fracturas y fallas, con el fin de que no se presente inestabilidad bajo el tránsito y condiciones climáticas esperadas, el uso de un laboratorio para el control de calidad es esencial para asegurar que la mezcla será satisfactoria.

Los agregados de granulometría gruesa con un tamaño máximo de una pulgada (25 mm) generalmente son especificados para la capa de superficie de rodamiento en carreteras, también se han usado una amplia variedad de granulometrías, desde finas a gruesas y agregados de granulometría abierta que han proporcionado un comportamiento satisfactorio para condiciones específicas.

La capa de superficie de rodamiento generalmente es preparada mediante mezclas en planta en caliente con un cemento asfáltico, pero también se ha obtenido un comportamiento satisfactorio mediante la mezcla fría en planta, o mezclando en el lugar con asfalto líquido o con emulsiones asfálticas.

Las especificaciones de construcción generalmente requieren que el material del líquido bituminoso sea aplicado sobre agregados sin tratamiento para la capa de base como un primer recubrimiento, sobre una base tratada o entre capas de la superficie de rodamiento para que sirva como una capa intercambiable.

Es particularmente importante que la superficie de rodamiento sea apropiadamente compactada durante la construcción.

una compactación inadecuada de la superficie de rodamiento es causal de una reducción de la vida del pavimento y de su nivel completo de comportamiento, los tipos de peligros que son frecuentemente relacionados con una compactación insuficiente durante la construcción incluyen: baches resultantes de la -- densificación bajo el tránsito, falla estructural debida al -- exceso de filtración de agua a través de la superficie de rodamiento y agrietamiento de la carpeta ocasionado por la fragilidad de la unión del asfalto resultante de la exposición -- al aire y al agua de la mezcla. Se sugiere que un peso volumétrico del 95 al 100% del que se obtiene en el laboratorio -- por el método de prueba usado para diseñar la superficie de -- rodamiento sea empleado.

DESARROLLO DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL PAVIMENTO.

El procedimiento presentado como una guía para el diseño de las estructuras de pavimento flexible está basado en los datos desarrollados por el camino de prueba AASHO, suplementados y modificados por los datos de otros caminos de prueba, otros procedimientos de diseño y las relaciones teóricas desarrolladas en estudios recientes. El procedimiento de diseño es presentado en la forma de nomogramas (Fig. IV.1 a y b) por facilidad en la solución de las ecuaciones de diseño. Las ecuaciones representadas por estos nomogramas fueron desarrolladas en base a las siguientes acepciones:

1.- Las ecuaciones básicas desarrolladas a partir del camino de prueba AASHO son una representación válida de las relaciones entre la pérdida de servicio que es expresada en términos de la reducción del valor del índice de servicio; el tránsito es convertido a el equivalente de 18 kips (8.2 ton) de carga por eje sencillo; el espesor del pavimento está representado por un número estructural.

2.- Las ecuaciones básicas desarrolladas por el camino de prueba AASHO para un sólo tipo de suelo de cimentación, puede ampliarse para otros tipos de suelos mediante una escala abstracta del valor de soporte del suelo realizada para este propósito.

3.- La ecuación desarrollada para la aplicación de repeticiones de cargas uniformes de tránsito puede extenderse a la aplicación de tránsito mezclado mediante la conversión

a carga por eje sencillo equivalente de 18 kips (8.2 ton).

4.- La ecuación para una condición climática adversa puede extenderse a otras condiciones climáticas perjudiciales por medio de un apropiado factor regional.

5.- Las ecuaciones para los materiales de sub-base, base y superficie de rodamiento usados en la construcción del camino de prueba puede ser extendido a la aplicación de otros materiales mediante la asignación de un coeficiente de capa apropiado (a_1 , a_2 , a_3).

6.- Las ecuaciones desarrolladas para las aplicaciones de tránsito acelerado durante los dos años del período de prueba puede ser extendida para aplicarlas a un período de tránsito extenso (arriba de 20 años).

7.- La uniformidad y alta calidad de construcción deben ser obtenidas, particularmente con respecto a el peso volumétrico, granulometría y calidad de materiales; la tersura de la superficie de rodamiento en ambos sentidos transversal y longitudinal.

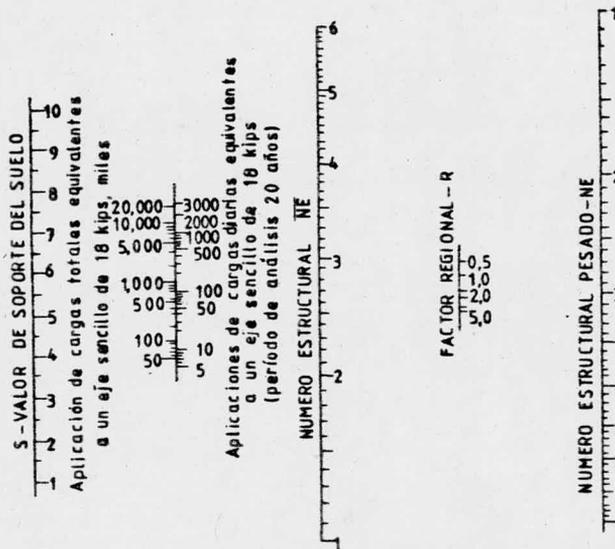


FIG IV.1 a, TABLA DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES
 NIVEL DE RECHAZO $P_t = 2.5$

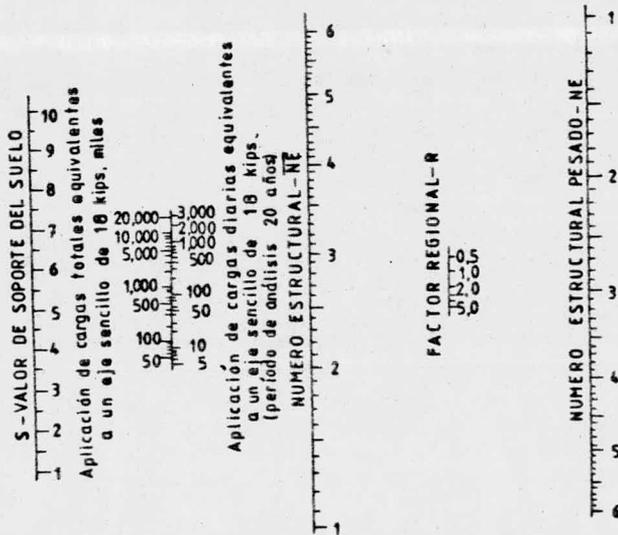


FIG IV.1 b, TABLA DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES
 NIVEL DE RECHAZO $P_t = 2.0$

USO DE LOS NOMOGRAMAS DE DISEÑO

Las ecuaciones de diseño son presentadas en forma de nomogramas para simplicidad de aplicación, los nomogramas son presentados en forma separada para un índice de servicio final (p_t) de 2.5 (Fig IV.1 a) y de 2.0 (Fig IV.1 b); la figura IV.1 a es propuesta para el uso en el diseño de una carretera con volúmenes de tránsito elevado, supone que el cambio de su superficie de rodamiento o reconstrucción serán ejecutados cuando el nivel de rechazo alcance 2.5 ; la Fig IV.1 b es usada para carreteras con menor volumen de tránsito y se puede tolerar un nivel de rechazo menor (2.0). Para el diseño de carreteras temporales o para una etapa de construcción se sugiere realizar un análisis del período de tránsito apropiado, en lugar de utilizar el nivel de rechazo.

Una vez que se ha decidido que índice de servicio final (nivel de rechazo p_t) se usará y el nomograma de diseño apropiado ha sido seleccionado, se realizan las siguientes determinaciones:

1.- Los valores representativos del soporte del suelo de cimentación del camino.

2.- El tránsito total equivalente diario de 18 kips (8.2 ton) de carga por eje sencillo estimados en la línea de diseño para el período de análisis del tránsito; porque la selección de los factores de equivalencia del tránsito que son usados para convertir el tránsito mezclado a el total e--

equivalente de 18 kips (8.2 ton) de carga por eje sencillo dependen del número estructural, entonces un número estructural debe suponerse para la conversión inicial. El uso de un número estructural NE= 3 dará resultados que son lo suficientemente exactos para los propósitos de diseño, esta suposición generalmente resultará en una sobreestimación de las cargas equivalentes del eje sencillo de 18 kips (8.2 ton) pero el error en el número estructural NE no es significativo.

3.- El factor regional aplicable al sitio donde se -- construirá la estructura del pavimento.

El nomograma requiere de dos pasos para cada solución primero, el valor de soporte del suelo de cimentación del camino (en la escala izquierda) y el total o equivalente diario en 18 kips (8.2 ton) de carga por eje sencillo para el período de análisis del tránsito (la segunda escala de izquierda a derecha)son usados para encontrar el valor del número estructural sin peso (escala central). Este número estructural sin peso es usado con el factor regional seleccionado (4a escala) para encontrar el NE de diseño (escala derecha) aplicable a la estructura total del pavimento. Los diseños apropiados son aquellos cuyas combinaciones de los diferentes tipos de materiales y espesores satisfacen la ecuación general:

$$NE = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3$$

donde:

a_1, a_2, a_3 = son los coeficientes de capa para los mate

riales de superficie de rodamiento, base y sub-base, respectivamente.

D_1, D_2, D_3 = Espesor de la superficie de rodamiento, capa de base y sub-base, respectivamente, en pulgadas.

NE = Número estructural para la estructura total del pavimento.

Si se desea considerar el uso de alternativas disponibles de los diferentes tipos de los materiales para una o más de las capas del pavimento, se puede utilizar el mismo procedimiento descrito, pero cambiando los coeficientes de capa al variar los diferentes tipos de materiales proporcionando exactamente el mismo número estructural. Entonces el diseño alternativo resultante puede ser comparado y se puede seleccionar la mejor alternativa en base a la economía, algunas consideraciones de construcción aplicables, mantenimiento o uso.

ESPESOR DE CAPA MINIMO.

En cualquier procedimiento de diseño es necesario considerar también la construcción, mantenimiento y operación a fin de evitar la posibilidad de producir un diseño impráctico y antieconómico, colocar espesores mayores que el mínimo en las capas de superficie de rodamiento, base o sub-base nos pueden llevar al tipo de diseño mencionado.

Para los propósitos del método de diseño AASHTO, los siguientes espesores se pueden considerar el mínimo práctico para aplicarlo a cada capa del pavimento:

Superficie de rodamiento	2 pulgadas (50 mm)
Capa de Base	4 " (100 ")
Capa de Sub-base	4 " (Si la sub base es usada)(100mm).

Porque tales mínimos dependen en algo de la práctica y de las condiciones locales, las agencias de diseño pueden en contrar deseable modificar los espesores mínimos anteriores - para su propio uso.

EJEMPLO DEL DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE EMPLEANDO EL METODO AASHO.

Se presentan dos problemas de diseño, el primero corresponde a las condiciones de tránsito de una carretera interestatal típica; el segundo corresponde a las condiciones - que se pueden encontrar en un camino secundario; el problema de la carretera interestatal también es resuelto usando un -- procedimiento de diseño alternativo. Otros problemas, tales como suelos expansivos, condiciones de congelamiento, etapas de construcción, mantenimiento, economía, también deben ser - considerados en adición a los factores incluidos en el análisis del diseño estructural.

La selección del índice de servicio final está basado en el nivel de rechazo más bajo que puede ser tolerado antes del reencarpetamiento o la reconstrucción. Para la carretera interestatal se toma un valor de 2.5 y 2.0 es tomado para el camino secundario.

Las cargas totales equivalentes a eje sencillo de 18_

kips (8.2 ton) para el carril de diseño, son determinadas a partir del tipo y cantidad del tránsito esperado sobre el período de diseño y los factores de tránsito equivalentes apropiados; se supone un NE inicial para calcular los coeficientes de equivalencia del tránsito, si el NE resultante de la solución mediante los nomogramas de diseño difiere del valor supuesto, apreciablemente, un nuevo valor se calculará, el número de cargas por eje sencillo de 18 kips (8.2 ton) recalculado y las operaciones de diseño repetidas.

Para estos ejemplos, se supone que el total de cargas por eje sencillo equivalente de 18 kips (8.2 ton) esperadas en el carril de diseño para los siguientes 20 años será igual a 8 500 000 (1,165 aplicaciones diarias) para la carretera interestatal y 100 000 (13.7 aplicaciones diarias) para el camino secundario.

La selección de un valor representativo para el soporte del suelo de cimentación del camino está basado en los resultados de un estudio del suelo y pruebas de laboratorio. Para ambos problemas se supone que el valor de soporte del suelo (S) para el suelo de cimentación del camino es de 3.0.

Un factor regional de 1.5 es aceptado para ser representativo de las condiciones ambientales en los sitios para ambos ejemplos.

Para cada uno de los siguientes ejemplos de diseño, el número estructural requerido NE es determinado a partir --

del nomograma de diseño apropiado, para el ejemplo de la interestatal, el nomograma de diseño para un nivel de rechazo de $p_t = 2.5$ (Fig IV.1 a), el cálculo se inicia localizando el valor de soporte del suelo de cimentación del camino (3.0), con las aplicaciones de carga por eje sencillo equivalente a 18 kips (8.2 ton) de 8 500 000 (1 165 diarias) y el factor regional (R) supuesto de 1.5; el valor del número estructural resultante (NE) es de 5.80.

Del mismo modo, para el ejemplo del camino secundario el nomograma de diseño para el nivel de rechazo $p_t = 2.0$ (Fig. IV.1 b) se entra al nomograma con el mismo valor de soporte del suelo supuesto (3.0) y el factor regional (1.5), pero con el total de aplicaciones de eje sencillo equivalente de 18 kips (8.2 ton) de 100 000 (13.7 diarias); el valor del número estructural resultante (NE) para estas condiciones es de 2.80.

Se pueden realizar diseños alternativos con variaciones en los espesores de la superficie de rodamiento, base y sub-base, además de emplear diferentes materiales de base y sub-base; un coeficiente de capa debe ser determinado para cada uno de los materiales componentes, para estos ejemplos de diseño, los coeficientes de capa son determinados para las condiciones y materiales que fueron usados para el camino de prueba AASHO; concreto asfáltico= 0.44; agregados de base= 0.14; y agregados de sub-base= 0.11. Los coeficientes de capa para otros materiales debe ser determinado por otros medios, tales como otros caminos de prueba, experiencia de campo, o -

teoría. Para estos ejemplos se supone que la base de concreto asfáltico ha sido determinada para tener un coeficiente de -- 0.40.

Los diseños alternativos posibles los cuales satisfacen el número estructural mínimo (NE) de 5.80 son como sigue: Determinación de los espesores de capa (ejemplo interestatal)

<u>Alternativa No. 1</u>	<u>Espesores (pulg)</u>		<u>coeficiente de capa</u>	<u>NE</u>
Superficie de rodamiento de concreto asfáltico	6	X	0.44	2.64
Agregados de base	12	X	0.14	1.68
Agregados de sub-base	<u>13 1/2</u>	X	<u>0.11</u>	<u>1.48</u>
Espesor total	31 1/2			NE=5.80

<u>Alternativa No. 2</u>	<u>Espesores (pulg)</u>		<u>coeficiente de capa</u>	<u>NE</u>
Superficie de rodamiento de concreto asfáltico	4	X	0.44	1.76
Base de concreto asfáltico	8	X	0.40	3.20
Agregados de sub-base	<u>8</u>	X	0.11	<u>0.88</u>
Espesor total	20			NE=5.84

Determinación de los espesores de capa (camino secundario)

<u>Alternativa No. 1</u>	<u>Espesores (pulg)</u>		<u>coeficiente de capa</u>	<u>NE</u>
Superficie de rodamiento de concreto asfáltico	2 1/2	X	0.44	1.10
Agregados de base	6	X	0.14	0.84
Agregados de sub-base	<u>8</u>	X	0.11	<u>0.88</u>
Espesor total	16 1/2			NE=2.82

<u>Alternativa No. 2</u>	<u>Espesores (pulg)</u>		<u>coeficiente de capa</u>	<u>NE</u>
Superficie de rodamiento de concreto asfáltico	4	X	0.44	1.76
Agregados de base	7 1/2	X	0.14	1.05

Espesor total 11 1/2

NE=2.81

<u>Alternativa No. 3</u>	<u>Espesores (pulg)</u>		<u>coeficiente</u>	<u>NE</u>
			<u>de capa</u>	
Superficie de rodamiento de concreto asfáltico	2	X	0.44	0.88
Base de concreto asfáltico	<u>5</u>	X	0.40	<u>2.00</u>
Espesor total	7			NE=2.88

CAPITULO V

CORRELACION DE ALGUNOS METODOS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE CON EL METODO DE LA AASHO.

En este capítulo se correlacionan dos métodos para el diseño de pavimentos flexibles: el de Carolina del Sur y el empleado en California.

V.I.- Aplicaciones de los resultados del camino de prueba AASHO para el diseño de pavimentos flexibles con el método utilizado en Carolina del Sur.

V.I.1.- En el Estado de Carolina del Sur se realizaron investigaciones de campo y laboratorio para el desarrollo de un procedimiento tentativo para la evaluación de las terracerías sobre las cuales se construirá un camino; el procedimiento incluye el uso de pruebas triaxiales no drenadas para la evaluación del módulo de deformación de los materiales de terracería. Apartir de este módulo de deformación, el valor de soporte del suelo para los materiales de terracería se determina permitiendo la aplicación del procedimiento general de diseño de la guía provisional AASHO en el diseño de las estructuras de pavimento flexible en Carolina del Sur.

V.I.2.- Descripción de las investigaciones de campo.- Se eligieron 16 lugares a lo largo de las carreteras existentes en diferentes regiones geográficas, con un índice de servicio bajo y otras con un índice de servicio alto, para propósitos de comparación.

El muestreo y las pruebas de peso volumétrico en el lugar se realizaron de la siguiente manera: Se escogió una --

sección de aproximadamente 3 pies cuadrados (1.20 m²) fuera de las rodadas de los vehículos y se extrajo con una sierra rotatoria de concreto; después de remover el pavimento se realizaron las pruebas de peso volumétrico en el lugar y contenido de humedad en las terracerías. Dada la dificultad para obtener muestras inalteradas, solamente se recogieron muestras de las terracerías en bolsas, también se midió el nivel de aguas freáticas y se realizaron pruebas de deflexión con la viga benkelman.

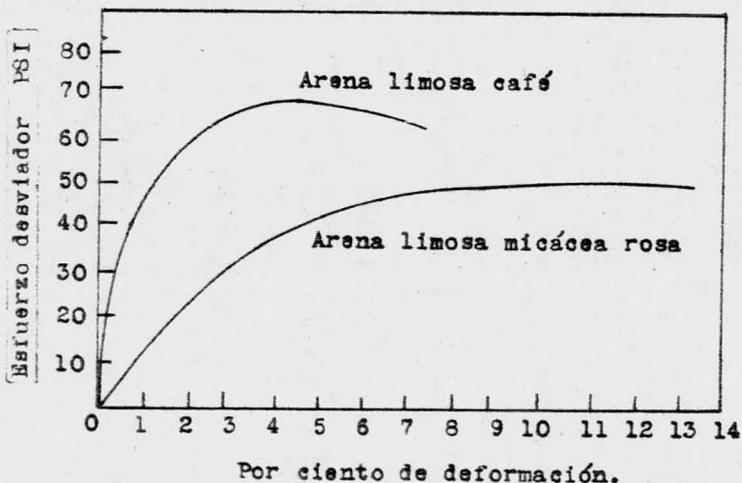
V.I.3.- Investigaciones de laboratorio.- Las propiedades y clasificación de los materiales de terracería muestreados se presentan en la tabla V.1.

Tabla V.1 Propiedades de los materiales de terracería

Descripción general del material	% que pasa la malla No.			Límites de Atterberg.		Clasificación AASHO
	10	40	200	L. L.	I. P.	
Arena limosa café	100	91	35	-	N.P.	A-2-4
Arena limosa gris	100	91	21	-	N.P.	A-2-4
Arena limosa micá cea café	100	71	33	26	4	A-2-4
Arena limosa micá cea rosa	100	66	29	-	N.P.	A-4
Arena limosa negra	100	89	24	-	N.P.	A-2-4

Los especímenes de 4" de diámetro y 8" de alto fueron moldeados con la humedad de campo mediante un pisón como el especificado para la prueba de compactación (Método de prueba AASHO T-99). Cada uno de los especímenes fue compactado en 5 capas de espesores iguales; el número de golpes con el pisón para cada una de las capas fue ajustado de tal manera que el peso volumétrico de los especímenes compactados sería cercano al peso volumétrico de campo. Los especímenes compactados fue

ron conservados con la humedad con que se realizaron y fue la misma con la que un día antes se realizaron las pruebas triaxiales. Las pruebas no drenadas fueron entonces ejecutadas en una escala de deformación de aproximadamente uno por ciento por minuto; durante las pruebas, las presiones laterales de los especímenes se conservaron constantes, para cada una de las series de pruebas se empleó una presión lateral de 5, 10 y 20 psi. Se obtuvieron los datos suficientes en la aplicación de cargas y la deformación correspondiente de los especímenes durante la prueba para la determinación del módulo de deformación, de las curvas esfuerzo-deformación que se muestran en las figuras siguientes.



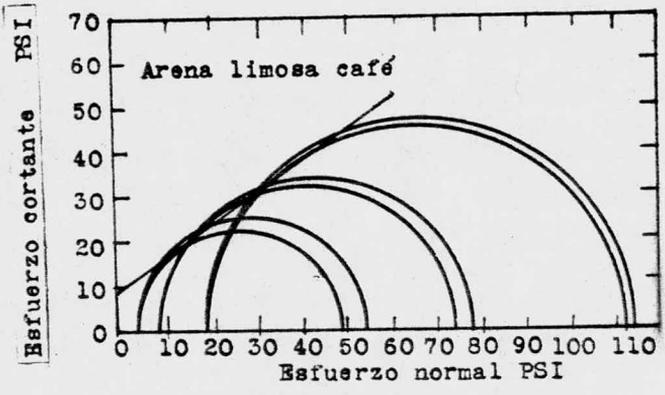


Fig. V.2.- Desarrollo de Mohr, suelo de terracería

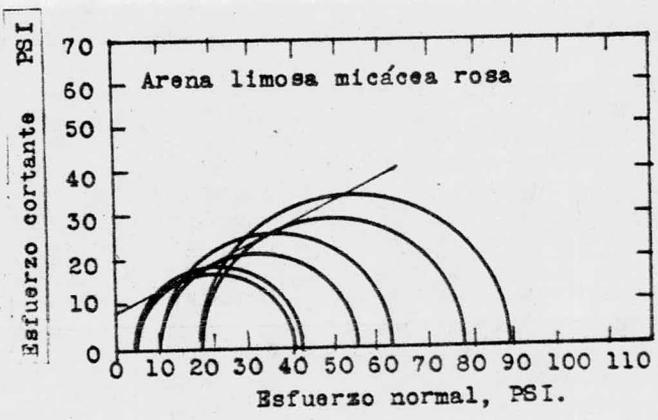


Fig.V.3.- Desarrollo de Mohr, suelo de terracerías.

V.I.4.- Procedimiento para la evaluación de las terracerías.- Para determinar un método específico para la evaluación del valor de soporte del suelo, se deben seguir las siguientes suposiciones y emplear este método empírico:-

1.- Para simplificar el procedimiento de prueba y proporcionar una base uniforme para la evaluación de las terracerías, el módulo de deformación fue determinado mediante el uso de pruebas triaxiales no drenadas con una presión lateral constante 10 psi (0.7 kg/cm^2) y una velocidad de deformación de uno por ciento por minuto.

2.- Tomando en cuenta que a los materiales del camino de prueba AASHO se les calculó un valor de soporte de 3.0 y de 10.0 (Arcilla con la que se construyó los terraplenes del camino y la capa de base que se consideró como terreno natural porque minimizaba los efectos perjudiciales de la arcilla tenían un módulo de deformación de 1 100 y 10 000 psi respectivamente.

3.- Se supone que el valor de soporte del suelo varía directamente con el logaritmo del módulo de deformación, como se muestra en la línea punteada de la fig. V.4.

4.- Es necesario proporcionar por anticipado las cargas por rueda para computar el esfuerzo desviador en las terracerías. El esfuerzo desviador aproximado cercano al centro del bulbo de presión debajo de los pavimentos de diferentes espesores se muestra en la figura V.5.

Los esfuerzos desviadores mostrados fueron computados

mediante la acepción de una presión de inflado de las llantas de 70 psi y que la teoría de Boussinesq es aplicable para este análisis.

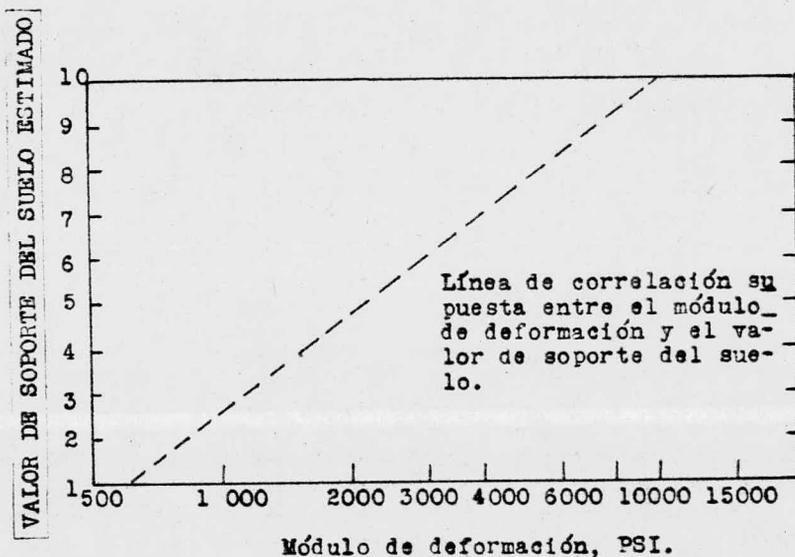


Fig V.4.- Correlación del valor estimado del soporte del suelo con el módulo de deformación de los materiales de terracería.

ESPEORES DE PAVIMENTO, EN PULGADAS

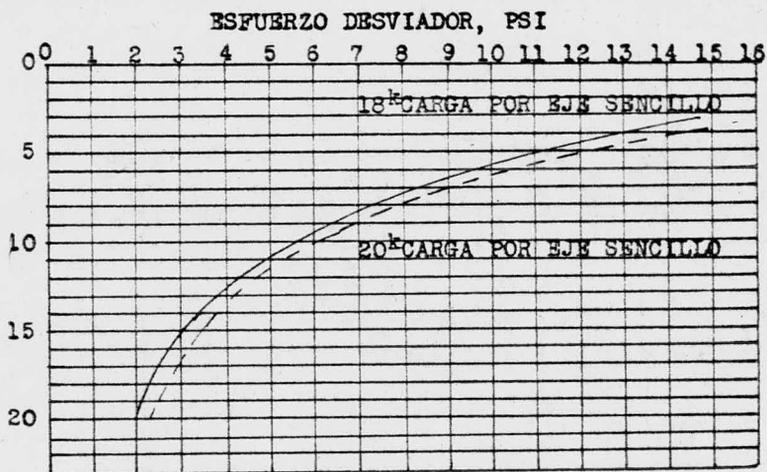


Fig. V.5.- Esfuerzo desviador para determinar el módulo de deformación requerido para el diseño de pavimentos flexibles.

V.II.- Espesores de pavimento flexible obtenidos mediante el método de California comparados con los datos del camino de prueba AASHO.

V.II.1.- Una fórmula de diseño para los elementos estructurales de un pavimento debe incluir todos los factores de importancia relacionados con la habilidad de la estructura del pavimento para soportar los efectos de las cargas de los vehículos en un período substancial de años. Se conoce de la existencia de 22 fórmulas diferentes, algunas de ellas se basan en conceptos teóricos, otras son completamente empíricas y algunas son el resultado de una combinación de la teoría y la práctica.

V.II.2.- Los factores que ejercen una gran influencia sobre el comportamiento del pavimento son tan numerosos, y los atributos deseables en un pavimento tan diversos que es prácticamente imposible o altamente improbable que todas estas variables puedan ser incluidas en una sola fórmula, o si existiera esta fórmula única se requeriría de una calculadora electrónica bastante sofisticada para proporcionar cada solución, además del tiempo de computadora requerido para realizar un trabajo perfecto.

▲ En la tabla V.II.1 se muestran las variables que pueden afectar el comportamiento de un pavimento asfáltico, se muestra en esta tabla que al menos 30 términos son identificables, pero en una fórmula de diseño no es necesario incluir -

todos estos factores ya que algunos pueden ser simplificados.

Como un ejemplo de las simplificaciones posibles y -- realmente prácticas, se describe un diseño estructural apropiado que produce pavimentos eficientes y económicos, los -- cuales no se agrietarán o deformarán bajo el tránsito calculado para la vida de diseño del pavimento. (Se debe considerar que los tipos de desintegración y fallas son un problema de -- la calidad de los materiales y del control de calidad de la -- mezcla más que un problema de diseño estructural). En la columna 3 de la Fig. V.II.1 se muestra que son tres los factores primarios: los efectos del tránsito la resistencia del pavimento y la capacidad del suelo de cimentación para soportar las cargas. A partir de estos factores primarios se puede establecer la siguiente relación.

$$T = \frac{K D (90 - R)}{S}$$

donde:

T = Espesor
K = Constante
D = Efectos destructivos del tránsito
R = Valor soporte de resistencia
S = Fortaleza de la estructura del pavimento.

Enjuiciando la validez de esta fórmula para el diseño de pavimentos mediante la comparación de los espesores calculados con los datos del camino de prueba AASHO, los siguientes factores deben ser considerados:

1.- Se realizaron todos los esfuerzos posibles para asegurar un alto grado de uniformidad en el camino de prueba,

y tal uniformidad de comportamiento no puede esperarse en una carretera construida por métodos ordinarios.

2.- En el camino de prueba se continuó el tránsito -- por un período de solamente dos años. Esto indica que no experimento el largo número de ciclos de altas y bajas de temperatura, el cambio de húmedo a seco con los efectos negativos en el comportamiento de una carretera durante varios años.

3.- Los pavimentos asfálticos y las bases en el camino de prueba tuvieron solamente dos años de edad cuando finalizó la prueba. Virtualmente todos los araltes con la edad se endu recen en algún grado y se vuelven quebradizos. No se puede su poner y comparar el buen comportamiento que tuvo el camino -- con respecto al largo período de tiempo que tienen de funcio nar en promedio las carreteras existentes.

Tomando en consideración lo anterior, una fórmula de_ diseño para estar del lado conservador, debe proporcionar al_ gún factor de seguridad sobre el espesor y la resistencia del pavimento el cual aparece para ser apenas adecuado en el cami no de prueba. Las primeras e importantes ventajas que presen ta la fórmula de California son:

1.- El procedimiento de California emplea valores nu_ méricos derivados de pruebas físicas del suelo de cimentación, la sub-base, la base y la carpeta.

2.- El método de California proporciona un medio lógi_ co para convertir las cargas por rueda del tránsito mezclado_ a un eje sencillo -Índice de tránsito. Este número experimen-

ta una correlación lineal directa con el espesor de la estructura del pavimento requerido.

3.- El método de California ha sido usado durante 13 años y ha demostrado que puede ajustar amplias variaciones - en el tipo de suelo, base y carpeta incluyendo las variaciones de carga por rueda y el número de repeticiones de carga.

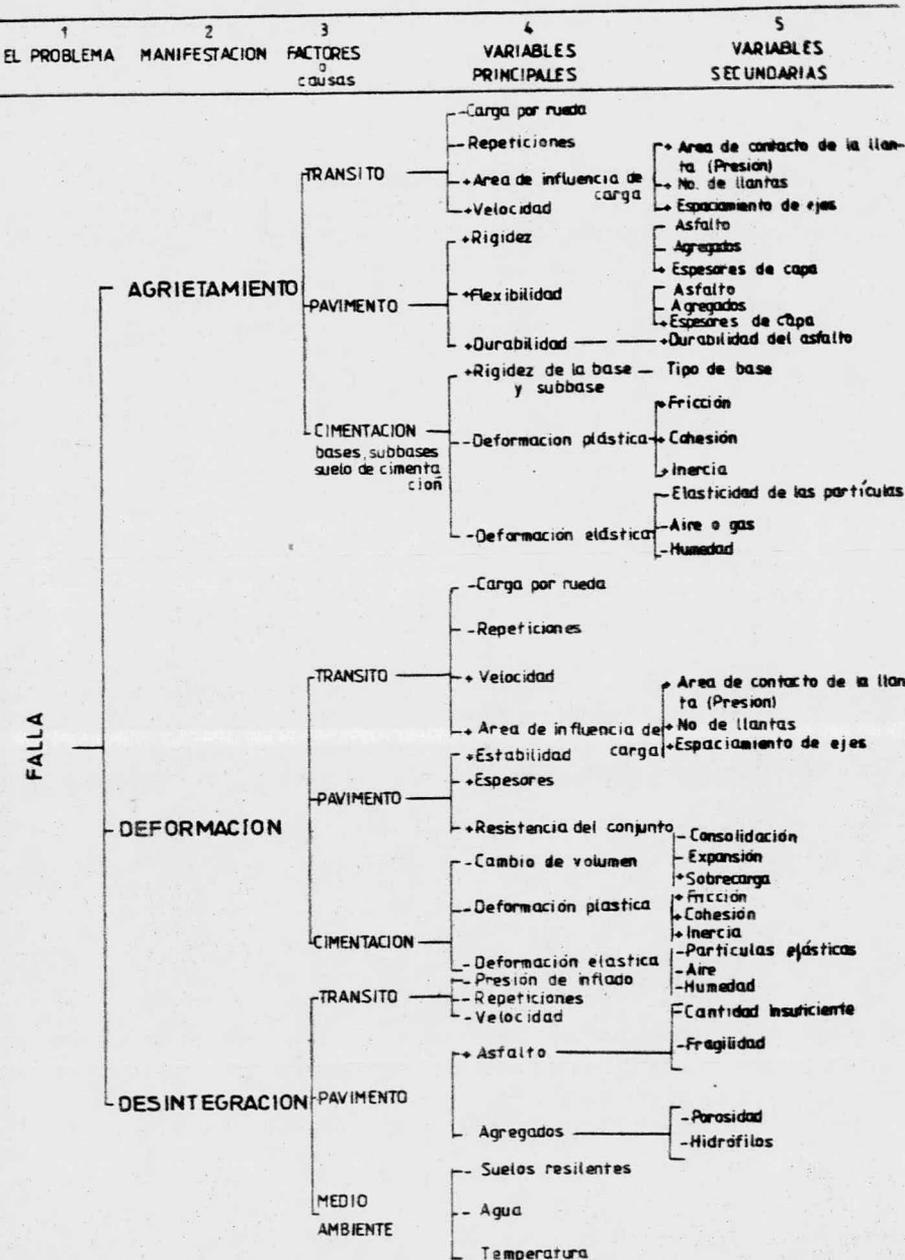


TABLA V.II.1 - Diagrama analítico para mostrar las variables que deben ser evaluadas en el diseño estructural de pavimentos asfálticos

CAPITULO VI

CORRELACION DE LA TECNOLOGIA MEXICANA PARA EL PROYECTO DE - PAVIMENTOS FLEXIBLES CON EL METODO DE DISEÑO AASHO

Con el objeto de realizar una adecuada correlación - entre la tecnología que se usa en México para el proyecto de pavimentos flexibles y el método de diseño AASHO, se analiza ran todas y cada una de las capas que constituyen un pavimen to flexible, además del suelo natural de cimentación y los - materiales empleados en la construcción del cuerpo del terra plén.

VI.1.- Terreno natural de cimentación de un camino.- Como su nombre lo indica, es el terreno natural sobre del -- cual se construirá un camino, en general no requieren de nin gún tratamiento, pero en casos específicos puede requerir de estabilización o de un tratamiento de mejoramiento mecánico.

VI.2.- Materiales del cuerpo del terraplén.- En Méxi co se ha empleado la siguiente especificación: Se puede uti lizar todo tipo de materiales excepto aquellos que tengan un alto contenido de materia orgánica; materiales provenientes de los cortes adyacentes, o de préstamos más o menos cercanos a la obra; con un límite líquido menor que 100 (actualmente - se estudia el hecho de aceptar materiales con tan alto límite líquido y se piensa cambiar la especificación a un límite lí quido de 60 o menor).

Tanto en la tecnología Porter Modificada como en el - método AASHO se contempla el hecho de incrementar los espeso res del pavimento cuando se construyan sobre suelos de baja -

calidad, además de mejorar su resistencia con una estabilización con cal o cemento.

VI.3.- Capa subrasante.- Esta capa es exclusiva de la tecnología mexicana, corresponde a la parte superior de las terracerías y se construye con material seleccionado con un espesor mínimo de 30 cm porque tiene cuando menos 7 finalidades además de su trabajo como porción estructural del pavimento:

1.- Resistir los esfuerzos de los vehículos que les son transmitidos por el pavimento.

2.- Transmitir los esfuerzos anteriores al resto de las terracerías, distribuidos de tal manera que puedan ser resistidos por los materiales subyacentes.

3.- Evitar la contaminación de la parte inferior del pavimento con los materiales que forman el cuerpo del terraplén.

4.- Evitar la incrustación del pavimento en el cuerpo del terraplén cuando esté formado por fragmentos de roca.

5.- Evitar que las imperfecciones de la cama de los cortes en roca, se reflejen en la superficie de rodamiento.

6.- Disminuir el costo de las capas del pavimento -- principalmente cuando se tienen terracerías de baja calidad.

7.- Uniformizar los espesores requeridos de pavimento al compensar la variación de resistencia en la terracería

En los casos en que se tengan terrenos naturales con

bajo valor de soporte o cuando en los terraplenes se utilicen por necesidad, materiales con rebote elástico, conviene colocar la capa subrasante mejorada con cal o cemento, para que los esfuerzos se distribuyan en zonas mucho más amplias y lleguen a las capas inferiores bastante disminuidos.

VI.4.- Capa de sub-base.- En el método AASHO la capa de sub-base compensa el espesor correspondiente a la capa subrasante de la tecnología mexicana. En México es una capa de calidad superior a la capa subrasante y se varía su espesor para satisfacer el tránsito acumulado al final de la vida útil del pavimento, en caso de que el diseño no la requiera, puede omitirse.

VI.5.- Capa de Base.- Son 3 las funciones básicas de la capa de Base:

- 1.- Recibir las cargas que le transmite la superficie de rodamiento (carpeta).
- 2.- Transmitir cargas adecuadamente distribuidas hacia la capa subrasante.
- 3.- Función drenante.

Son 5 sus características más importantes:

- 1.- VRS
- 2.- Plasticidad
- 3.- Valor cementante
- 4.- Adherencia con el asfalto
- 5.- Granulometría

Siendo esencial que cumpla con las dos primeras características. Cuando el espesor de la carpeta asfáltica no es muy considerable (7 cm) se hace necesario que la base tenga un buen valor cementante.

Son muy similares las funciones y características de las bases para el método de diseño de la AASHO.

VI.6.- Superficie de rodamiento (carpeta).- Son utilizadas para dar una superficie de rodamiento tersa al tránsito además de que debe ser resistente a derrapadas; de acuerdo con el nivel de tránsito es el tipo de carpeta, difiere del método AASHO en que ellos proponen un espesor mínimo de carpeta de concreto asfáltico (5 cm) y en México se varía el tipo de carpeta para tránsito bajos.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto se pueden comparar los métodos de diseño, ya que las capas de pavimento son similares; así se procede a realizar la correlación de acuerdo a los espesores que se obtienen con uno y otro método para las condiciones climáticas y materiales de calidad similar.

Por facilidad, se supondrá un tránsito acumulado de ejes de 8.2 ton equivalentes: 100 000, 500 000, 1'000 000, 5'000 000, 10'000 000 y 15'000 000 de ejes equivalentes.

Como en la tecnología Porter Modificada se emplea la capa subrasante y con el fin de hacer posible la correlación con el método AASHO se consideraran los espesores del pavimen

to por calcular a partir del cuerpo del terraplén que tiene un valor de soporte "S" del suelo de 3.0 y es el que corresponde a un material arcilloso cuyo valor relativo de soporte VRS=2.8 (porter Modificada). Las capas que se utilizarán son: sub-base, base y carpeta de concreto asfáltico.

Método A A SHO

$$D = 0.44D_1 + 0.14d_2 + 0.11D_3$$

D = Índice de espesor

D_1 = espesor de concreto asfáltico

D_2 = espesor de Base (roca triturada)

D_3 = espesor de subbase

Método Porter Modificada

$$D = 2.0 d_1 + 1.5 d_2 + 1.0 d_3$$

D = espesor total

d_1 = espesor de concreto asfáltico.

d_2 = espesor de base (roca triturada)

d_3 = espesor de sub-base.

Utilizando las gráficas respectivas

$$\Sigma L = 100\ 000$$

$$2.7 = 0.44(2") + 0.14(3") + 0.11 D_3$$

$$2.7 = 0.88 + 0.42 + 0.11 D_3$$

$$D_3 = (2.7 - 0.88 - 0.42) / 0.11$$

$$D_3 = 7" = 17.5\text{ cm}$$

$$38 = 2.0(5\text{cm}) + 1.5(7.5\text{cm}) + 1.0 d_3$$

$$d_3 = 38 - 10 - 11.25$$

$$d_3 = 16.75\text{ cm}$$

Espesores

Capa

Espesores

5 cm

Carpeta

5 cm

7.5 cm

Base

7.5 cm

17.5 cm

Sub-base

17 cm

$$\Sigma L = 500\ 000$$

$$3.5 = 0.44(2") + 0.14(3") + 0.11 D_3$$

$$47 = 2.0(5) + 1.5(7.5) + 8B$$

$$D_3 = (3.5 - 0.88 - 0.42)/0.11 \quad SB = 47 - 10 - 11.25$$

$$D_3 = 20'' = 50 \text{ cm}$$

$$d_3 = 25.75 \text{ cm}$$

Espesores	Capas	Espesores
5 cm	Carpeta	5 cm
7.5 cm	Base	7.5 cm
50.0 cm	Sub-base	26.0 cm

$$\Sigma L = 1'000 \text{ 000}$$

$$4 = 0.44(2'') + 0.14(3'') + 0.11 D_3 \quad 47 = 2.0(5) + 1.5(15) + 1 d_3$$

$$D_3 = (3.5 - 0.88 - 0.42)/0.11$$

$$d_3 = 52 - 10 - 22.5$$

$$D_3 = 20.8'' = 52 \text{ cm}$$

$$d_3 = 19.5 \text{ cm}$$

Espesores	Capas	Espesores
5 cm	Carpeta	5 cm
15 cm	Base	15 cm
52 cm	Sub-base	19.5 cm

$$\Sigma L = 5'000 \text{ 000}$$

$$5 = 0.44(6'') + 0.14(6'') + 0.11 D_3 \quad 67 = 2.0(15) + 1.5(15) + d_3$$

$$D_3 = (5.5 - 2.64 - 0.84)/0.11$$

$$d_3 = 67 - 30 - 22.5$$

$$D_3 = 14'' = 34.5 \text{ cm}$$

$$d_3 = 14.5 \text{ cm}$$

Espesores	Capas	Espesores
15 cm	Carpeta	15 cm
15 cm	Base	15 cm
34.5 cm	Sub-base	14.5 cm

$$\Sigma L = 10'000 \text{ 000}$$

$$5.5 = 0.44(6") + 0.14(9") + 0.11 D_3 \quad 74 = 2.0(15) + 1.5(20) + d_3$$

$$D_3 = (5.5 - 2.64 - 1.26)/0.11 \quad d_3 = 74 - 30 - 30$$

$$D_3 = 14.54 \text{ " } = 36.5 \text{ cm} \quad d_3 = 14 \text{ cm}$$

Espesores	Capas	Espesores
15 cm	Carpeta	15 cm
22.5 cm	Base	20 cm
36.5	Sub-base	14 cm

$$\Sigma L = 15'000 \text{ 000}$$

$$6 = 0.44(6") + 0.14(9") + 0.11 D_3 \quad 77 = 2.0(15) + 1.5(15) + d_3$$

$$D_3 = (6 - 2.64 - 1.26)/0.11 \quad d_3 = 77 - 30 - 22.5$$

$$D_3 = 19 \text{ " } = 48 \text{ cm} \quad d_3 = 24.5 \text{ cm}$$

Espesores	Capas	Espesores
15 cm	Carpeta	15 cm
22.5 cm	Base	15 cm
48 cm	Sub-base	24.5 cm

Para poder comparar los dos diferentes espesores que proporcionan el método de diseño AAS HO y el de Porter Modificada, es necesario calcular un espesor equivalente a material natural de sub-base (grava-arena) y como los espesores de carpeta y de base se mantuvieron constantes para casi todos los cálculos se emplearan las mismas equivalencias para los dos métodos de diseño y se llevaran a la gráfica suma de ejes acumulados - espesores (cm) (Fig. VI.I).

Equivalencias.- 1" de concreto asfáltico = 4" de grava-arena; 1" de base de roca triturada = 1.25" (g-a).

Conversión de los espesores de las diferentes capas de pavimento a el material natural de sub-base (grava-arena).

ΣL	Capa	Método AASHO	eq. (g-a)	Porter Mod.	eq.
100 000	carpeta	2"	8"	2"	8"
	base	3"	3.75"	3"	3.75"
	sub-base	7"	7"	7"	7"
			<u>18.75"</u>		<u>18.75"</u>
Espesores totales en cm		-----	48 cm	-----	48 cm
500 000	carpeta	2"	8"	2"	8"
	base	3"	3.75"	3"	3.75"
	sub-base	20"	<u>20"</u>	10.4"	<u>10.4"</u>
			31.75"		22.15"
Espesores totales en cm		-----	80 cm	-----	56.5 cm
1'000 000	carpeta	2"	8"	2"	8"
	base	6"	7.5"	6"	7.5"
	sub-base	20.72"	<u>20.72"</u>	8"	<u>8"</u>
			36.22"		23.5"
Espesores totales en cm		-----	91 cm	-----	57 cm
5'000 000	carpeta	6"	24"	6"	24"
	base	6"	7.5"	6"	7.5"
	sub-base	14"	<u>14"</u>	6"	<u>6"</u>
			45.5"		37.5"
Espesores totales en cm		-----	114 cm	-----	95.25 cm
10'000 000	carpeta	6"	24"	6"	24"

base	9"	11.25"	8"	10"
sub-base	14 1/2"	<u>14.5"</u>	5.6"	<u>5.6"</u>
		49.75"		39.6"
Espesores totales en cm =	125 cm		-----	99 cm
15'000 000 carpeta	6"	24"	6"	24"
base	9"	11.25"	6"	11.25"
sub-base	19"	<u>19"</u>	10"	<u>10"</u>
		54.25"		45.25"
Espesores totales en cm =	136 cm		-----	113.25cm

Con estos datos se realiza la correlación entre los dos métodos de diseño; en la Fig. VI. II se muestra la gráfica espesores método AASHO - espesores método Porter Modificada - (cm) además de calcular la línea de regresión y el error estándar.

Interpretación de los resultados de la Fig. VI. II.-

Aunque el coeficiente de correlación obtenido indica una correlación lineal directa, no se puede considerar que los dos métodos de diseño tengan resultados similares, debido a que el error estándar estimado es del orden de 10.7 cm; en realidad, como lo muestra la figura mencionada, para grandes volúmenes de tránsito, se puede incurrir en un error de aproximadamente 21 cms, esto indica que los pavimentos diseñados con la tecnología Porter modificada se encuentran subdiseñados con respecto a el método AASHO; pero antes de afirmar lo anterior es necesario considerar otros aspectos.

**Análisis del aspecto económico que interviene
en el diseño de pavimentos flexibles.**

Se puede considerar que la carretera más económica es aquella que tiene una resistencia relativa uniforme en todas sus capas y llega a la falla funcional cuando ha soportado el número acumulado de cargas equivalentes (ΣL) especificadas para la vida del proyecto del camino. Si la resistencia relativa no es uniforme en las diferentes capas de la estructura, se supone que la capa de resistencia mínima determina la vida de servicio de la carretera. (Ref. 6).

La falla funcional es aquella que tienen los caminos cuando las deformaciones superficiales son mayores a las tolerables, de acuerdo con el tipo de camino de que se trate; ya que se puede tener una superficie de rodamiento con deformaciones, que sean aceptables para caminos secundarios pero que puede considerarse inconveniente para autopistas y por lo tanto que ha llegado la falla funcional. (Ref. 4).

En la mayor parte de las carreteras construidas a la fecha, diseñadas con el método descrito (Porter Modificada), se han obtenido estructuras razonablemente satisfactorias y más económicas que las diseñadas en algunos otros lugares para condiciones similares. (Ref. 6).

De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que el método de diseño AASHO es aplicable en países desarrollados, donde no es tan fundamental el aspecto económico, además de

que la conservación en un pavimento sobrediseñado puede ser reducida. En los países en vías de desarrollo (México) y en países subdesarrollados, es necesario construir pavimentos funcionales y económicos como los que se diseñan con la Tecnología Porter Modificada, así la falla funcional o estructural se presentará al final de la vida de proyecto del camino.

Con el fin de aprovechar los estudios y experiencias obtenidas a partir del camino de prueba AASHO, se hace un ajuste en el nomograma con el valor de soporte del suelo (S) y el valor relativo de soporte VRS (Porter modificada) de -- tal manera que se establezca un rango en el cual las dos tecnologías presenten resultados compatibles. En la Fig. VI.III se muestra esta adaptación, la correlación de los diseños -- calculados con la Tecnología Porter Modificada y el método -- AASHO adaptado al VRS se presentan en la Fig.VI.IV.

Los datos con que se realizó esta gráfica se muestran a continuación:

N	X	Y	XY	X ²	Y ²
1	16.3	17	277.1	265.69	289
2	19	22	418	361	484
3	22	25	550	484	625
4	26.5	31	821.5	702.25	961
5	26	33	858	676	1089
6	34	36	1224	1156	1296
7	34	40	1360	1156	1600

N	X	Y	XY	X ²	Y ²
8	32.5	45	1462.5	1056.25	2025
9	34	47	1598	1156	2209
10	41	41	1681	1681	1681
11	41	52	2132	1681	2704
12	41	58	2378	1681	3364
13	46	44	2024	2116	1936
14	45	45	2025	2025	2025
15	45	54	2430	2025	2916
16	49	49	2401	2401	2401
17	50	50	2500	2500	2500
18	52	57	2964	2704	3249
19	56	56	3136	3136	3136
20	57	60	3420	3249	3600
21	57	67	3819	3249	4489
22	66	66	4356	4356	4356
23	68	78	5304	4624	6084
25	77	77	5929	5929	5929
26	81	84	6804	6561	7056
27	91	91	8281	8281	8281
28	49	64	3136	2401	4096
<hr/>					
	$\Sigma X = 1324.3$	$\Sigma Y = 1462$	$\Sigma XY = 78253.1$	$\Sigma X^2 = 72237.19$	$\Sigma Y^2 = 85710$

Resultados finales.- Para lograr la adaptación del método Porter Modificada a el nomograma de la AASHO, se calcularon los espesores Porter Modificados con una carpeta de concreto asfáltico con un espesor de 8 cms, colocada sobre una base rigidizada con cemento portland de 15 cms de espesor, de tal manera que la única variable por calcular es la sub-base; las aplicaciones totales de carga por eje sencillo equivalente de 8.2 ton estan en un rango de 500 000 a - - - 20 000 000, se intentó extrapolar a otras condiciones de pavimento (diferentes tipos de carpetas y bases), pero los resultados fueron muy variables. El factor regional se consideró unitario, porque en el VRS Porter Modificado ya se proporciona el peso volumétrico y la humedad que se puede presentar en el campo.

Para las condiciones de pavimento en que sí es aplicable el nomograma AASHO adaptado, el coeficiente de correlación es $r = 0.96$ y el error estándar estimado es $S_y = 5.12$ cm, esto quiere decir que aproximadamente el 67% de los diseños pueden resultar sobre o subdiseñados con respecto a el espesor de la sub-base en 5.12 cm. Para que el 95% de los diseños se puedan considerar resultados compatibles, el error estándar estimado es de alrededor de 10 cms, también con respecto a el espesor de la sub-base; porque como ya se mencionó los espesores y materiales de la carpeta y la base se mantienen constantes.

Definición de los términos estadísticos empleados.-

I Coeficiente de correlación.

Se utiliza la correlación lineal para determinar si existe una relación entre dos variables. Puede ser directa, inversa, o bien puede no existir relación entre las variables.

El coeficiente de correlación de Pearson para un conjunto de datos no agrupados tiene el límite teórico de ± 1 . Un valor de "r" próximo a +1 indica una relación directa entre las variables, mientras que un valor aproximado a -1 indica una relación inversa. Un valor de "r" tendiendo hacia 0 indica que no existe relación entre las variables.

$$r = \frac{\frac{\sum xy}{N} - \frac{\sum x \sum y}{N^2}}{\sigma_x \sigma_y}$$

donde:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum x^2}{N} - \frac{(\sum x)^2}{N^2}}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum y^2}{N} - \frac{(\sum y)^2}{N^2}}$$

x = espesor actual -cm.

y = espesor calculado -cm.

N = Número de puntos

r = coeficiente de correlación.

σ = desviación estándar.

II Línea de regresión.

Si la gráfica de los datos indica una relación lineal entre las variables, entonces una línea recta es la forma más apropiada de representar estos datos y se denomina línea de regresión. La ecuación general es expresada como $Y = m X + b$ y los valores de m y de b se encuentran usando el método de los mínimos cuadrados.

$$Y = m X + b$$

donde:

$$m = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

N = número de puntos

y = espesor calculado cm.

x = espesor actual cm.

m = pendiente

b = intersección en Y .

III Estimación del error estándar.

La estimación del error estándar mide la concentración de los puntos agrupados alrededor de la línea de regresión.

Una zona dibujada paralela a la línea de regresión en cada uno de los lados a una distancia vertical S_y incluirá aproximadamente el 67% de los puntos. Una distancia vertical de $2 S_y$ incluirá aproximadamente el 95% de los puntos

$$S_y = \sigma_y \sqrt{1 - r^2}$$

donde:

σ_y = desviación estándar

r = coeficiente de correlación

S_y = estimación del error estándar en

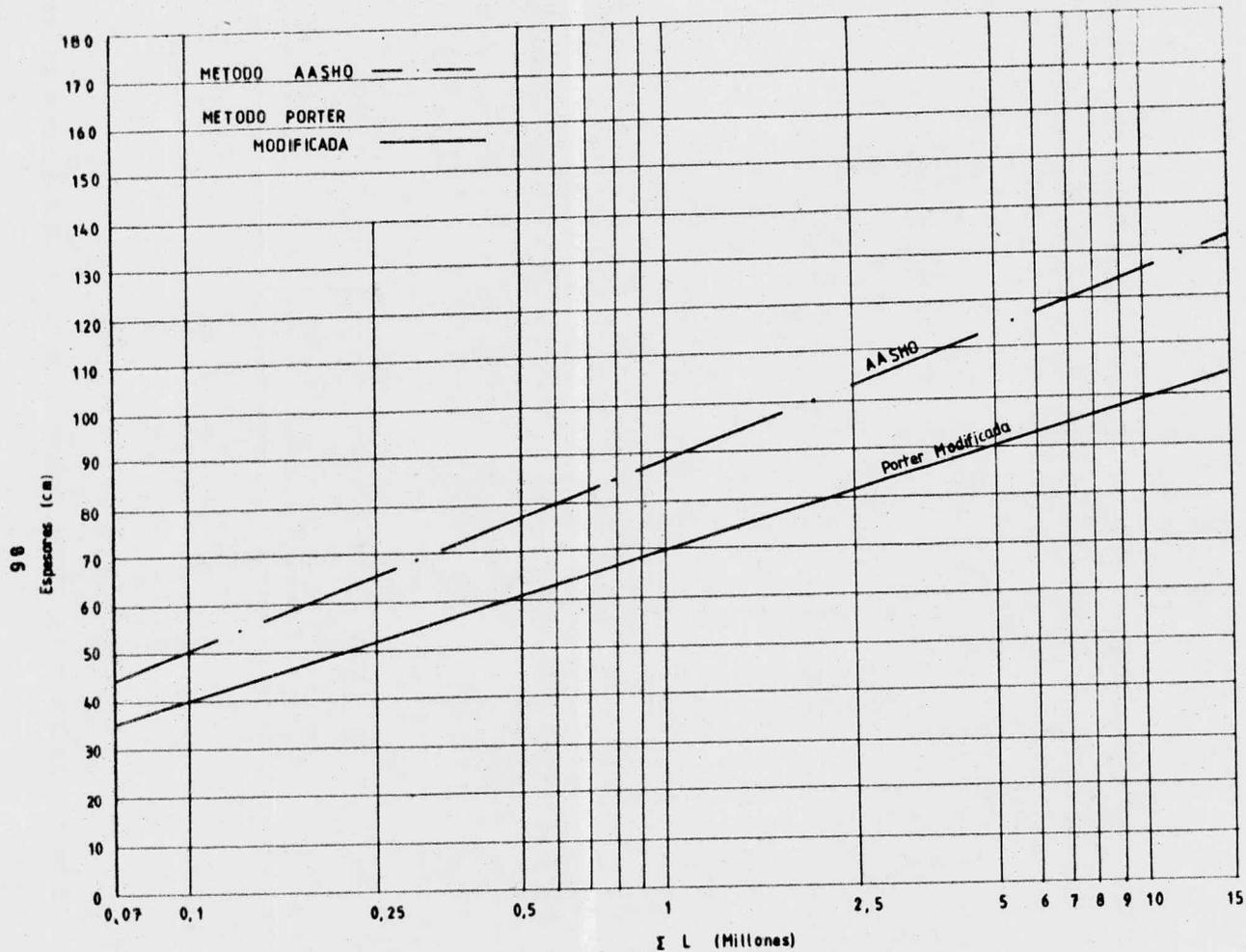


Fig. VI.17 Comparación de espesores AASHO - Porter Modificada a diferentes volúmenes de tránsito.

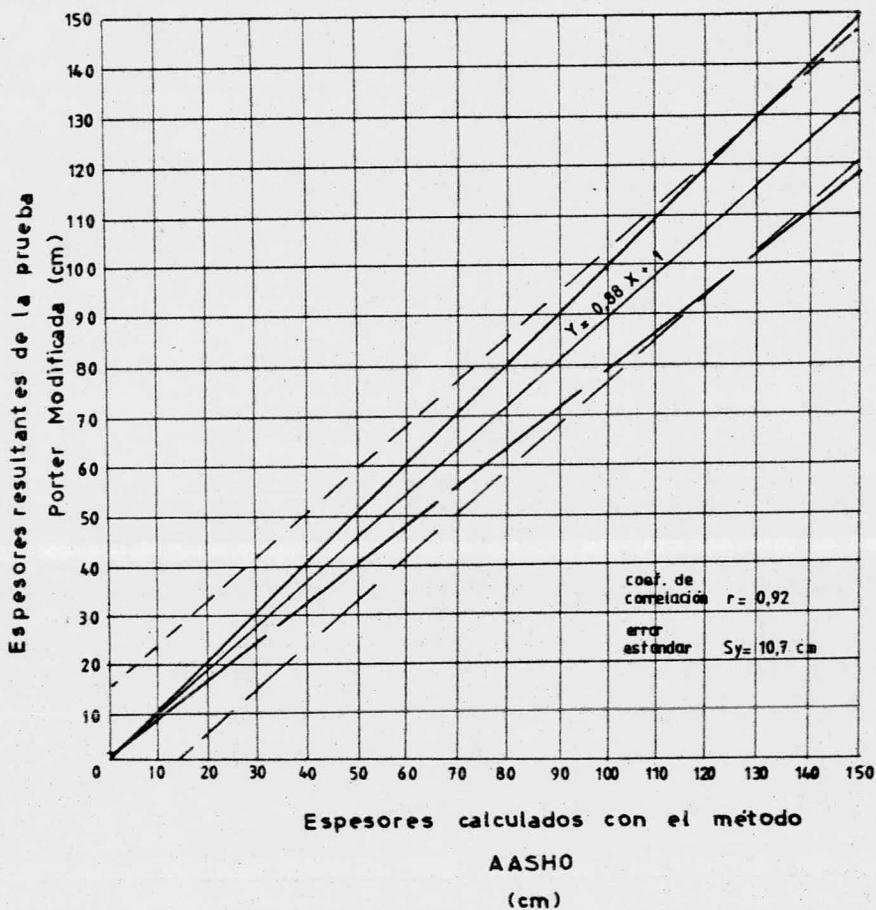


FIG. VI.II.- Espesores calculados con el método AASHTO VS espesores
 Porter Modificados

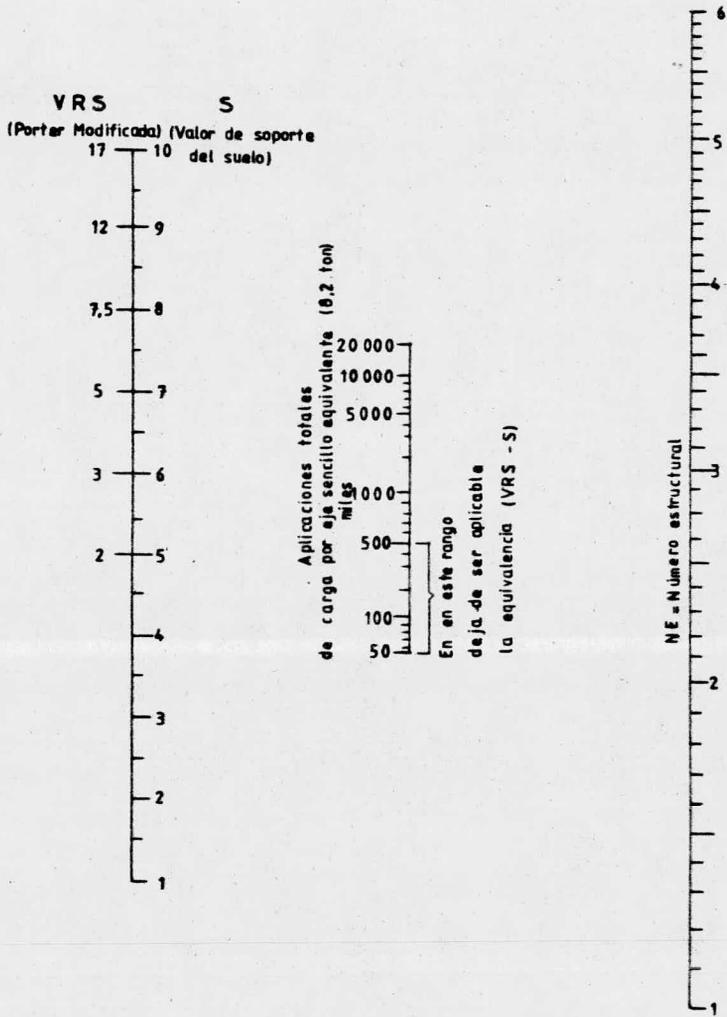


FIG. VI.III.- Gráfica resultante de la adaptación de espesores a partir del VRS (Porter Modificada) al nomograma AASHO.

Coefficiente de
Correlación

$$r = 0.96$$

Línea de regresión

$$Y = 0.948 X + 7.36$$

Error estándar

$$S_y = 5.12 \text{ cm}$$

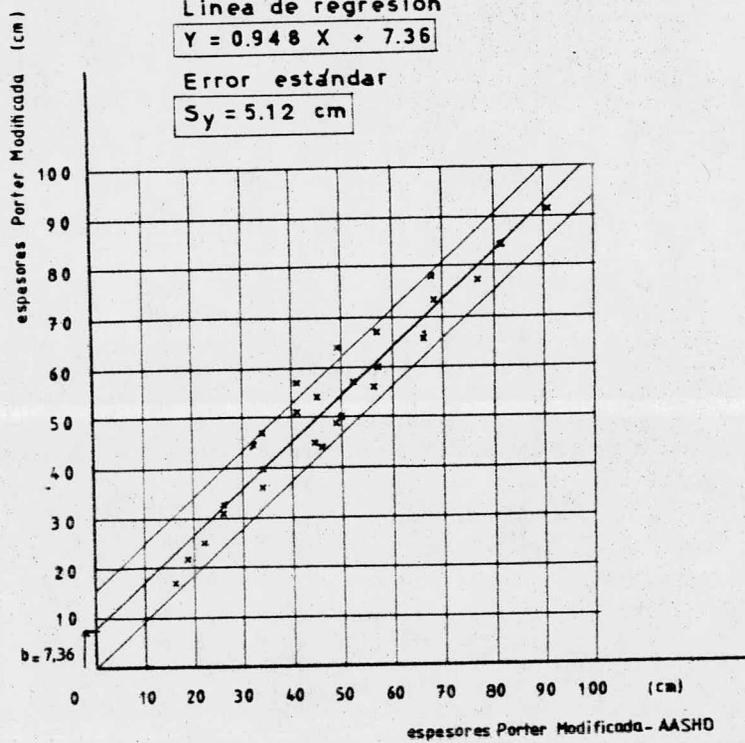


Fig. VI.IV.- Espesores Porter Modificados VS espesores
resultantes de la adaptación Porter Modificada-
AASHTO

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

1.- Existen numerosos métodos para el diseño de pavimentos flexibles, se conoce de la existencia de 22 fórmulas diferentes, algunas de ellas se basan en conceptos teóricos, otras son completamente empíricas y las demás son el resultado de una combinación de la teoría con la práctica.

2.- La Asociación Americana de Carreteras Estatales Oficiales (AASHO) realizó un camino de prueba para determinar las relaciones significativas entre el número de repeticiones de carga por eje con diferente intensidad y disposición, y el comportamiento de diferentes espesores de pavimento construidos sobre un suelo de características conocidas.

3.- El método de diseño AASHO, desarrollado a partir del camino de prueba, no es un intento por reemplazar los procedimientos de diseño que son usados satisfactoriamente, ya que por tratarse de un camino de prueba tiene limitaciones, tales como que se construyó con materiales seleccionados de la mejor calidad, un sólo suelo de cimentación y un mismo medio ambiente, además de un procedimiento acelerado para la acumulación del tránsito, que consistió en la operación de vehículos con idénticas cargas y configuración de ejes, en lugar del tránsito mezclado.

4.- En el método AASHO se puede incorporar el uso de pruebas triaxiales no drenadas para la evaluación del módulo de deformación de los materiales del suelo de cimentación.

A partir de este módulo de deformación se determina el valor de soporte del suelo, esto es conveniente ya que el método AASHO no proporciona un sistema para elegir que valor de soporte le corresponde a cada tipo de suelo de cimentación dejándolo a la experiencia y el juicio ingenieril.

5.- La tecnología mexicana para el proyecto de pavimentos flexibles (Porter Modificada) ha producido estructuras de pavimento satisfactorias y más económicas que las diseñadas en otros lugares para condiciones similares.

6.- Al efectuar la correlación de la Tecnología mexicana para el proyecto de pavimentos flexibles (Porter Modificada) con los resultados del camino de prueba AASHO, se muestra que para condiciones de materiales, suelo de cimentación y medio ambiente similares, los espesores del pavimento de la Porter Modificada son bastante menores que los espesores de la AASHO, sobre todo para grandes volúmenes de tránsito, si se considera lo anterior, se puede pensar que el método Porter Modificada obtiene pavimentos subdiseñados; pero en realidad los pavimentos que se han diseñado empleando la tecnología Porter Modificada son funcionales y económicos.

7.- Con el fin de aprovechar los estudios y la experiencia adquirida con la construcción del camino de prueba AASHO, se realizó una adaptación del nomograma resultante de este método, para que proporcione resultados adecuados a las necesidades actuales y futuras de las carreteras que se cons-

truyan en México; pero es necesario mencionar que el uso de este nomograma está restringido a ciertas condiciones, como son el uso de una carpeta de concreto asfáltico de 8 cms, - colocada sobre una base rigidizada con cemento portland de 15 cms de espesor, de tal manera que la única variable es - el espesor de la sub-base; además de que se corre el riesgo de subdiseñar o sobrediseñar con respecto a la Tecnología - Porter Modificada un espesor de sub-base de alrededor de -- 10 cms en el 95% de los pavimentos que se diseñen aplicando esta adaptación.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures, - American Association of State Highway Officials, Washington (1972).
- 2.- C. J. Van Till, B. F. McCullough, B. A. Vallerga, and R. G. Hicks. Evaluation of AASHTO Interim Guides for Design of Pavement Structures. National Cooperative Research -- Program Report No 128, Highway Research Board, National Academy of Sciences, Washington (1972).
- 3.- E.J. Yoder. and Witzak. Principles of Pavement Design. - E. J. Yoder. 2a Edición 1975.
- 4.- Fernando Olivera Bustamante. Tecnología para el Proyecto de Pavimentos Flexibles. Porter Modificada (México). Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón.
- 5.- F. N. Hveem and G. B. Sherman, Thickness of Flexible Pavements by the California Formula Compared to AASHTO Road Test Data, HRB, Highway Research Record No 13, National Academy of Sciences, Washington (1963).
- 6.- Santiago Corre C. y Guillermo Prado O. Diseño Estructural de Carreteras con Pavimento Flexible. Instituto de Ingeniería de la UNAM (1973).
- 7.- T. Y. Chu, W. K. Humphries and Oren S. Fletcher. Application of AASHTO Road Test Findings to the Design of Flexible Pavement Structures in South Carolina.