

**MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS, TRANSPORTE,
Y DE VIVIENDA Y DESARROLLO URBANO**

VICEMINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

**UNIDAD DE INVESTIGACION
Y DESARROLLO VIAL**

**ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL
MODULO DE REACCION DE LA
SUBRASANTE (k-VALUE)**

**Elaborado por: Julio Alfredo Rivera Alonzo, Ingeniero Civil¹.
Jefe de Laboratorio de Materiales e
Investigación Vial.**

**Alejandro Salazar Meléndez, Ingeniero Civil².
Gerente Dpto. de Suelos y Materiales.**

**Coordinador: Daniel Antonio Hernández Flores, Ingeniero Civil.
Director, Unidad de Investigación y Desarrollo Vial.**

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, ABRIL DE 2006

¹ Actualmente Gerente del Depto. de Suelos y Materiales de la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial.

² Laboró en la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial hasta el 31 de Mayo de 2006.

OBSERVACION

El contenido de este documento refleja opiniones de los autores, quienes son responsables de los hechos y de la exactitud de los datos presentados. El contenido no refleja necesariamente las opiniones y políticas oficiales del Ministerio de Obras Públicas de El Salvador. Este documento no constituye una norma, especificación ni regulación.

INDICE

	Página
1.0 Resumen.	1
2.0 Introducción.	1
3.0 Antecedentes.	1
4.0 Generalidades sobre el Módulo de Reacción de la Subrasante (k-value).	3
5.0 Determinación del k-value de diseño de acuerdo con AASHTO-1993.	4
6.0 Determinación del k-value de diseño de acuerdo con AASHTO-1998.	10
7.0 Incidencia del parámetro k-value en el espesor de la losa de concreto.	20
8.0 Conclusiones.	26
9.0 Referencias.	27

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL MODULO DE REACCION DE LA SUBRASANTE (k-VALUE)

1.0 Resumen.

El presente documento contiene información relacionada con la determinación del Módulo de reacción de la subrasante (k-value) utilizado para el diseño de pavimentos de concreto de cemento Pórtland con juntas simples, tomando como base los documentos: “AASHTO Guide for Design of Pavements Structures 1993” y “Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavements Structures 1998”.

El documento incluye también un análisis de sensibilidad del parámetro k-value en el dimensionamiento del espesor de la losa de concreto con base en los criterios de diseño considerados en los mencionados documentos.

2.0 Introducción.

El Ministerio de Obras Públicas es el ente gubernamental encargado de la administración de la red vial nacional, lo cual requiere entre otros aspectos, de la investigación y evaluación de diferentes alternativas para el dimensionamiento de estructuras de pavimento que proporcionen la mejor solución para la demanda del flujo vehicular.

Al respecto el Viceministerio de Obras Públicas, a través de la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial (UIDV-VMOP) ha desarrollado el presente documento, el cual contiene un resumen de las recomendaciones presentadas por la guía AASHTO-1993 y AASHTO-1998 para la caracterización de la subrasante, para ser utilizada en diseños de pavimentos de concreto de cemento Pórtland con juntas simples (JPCP).

3.0 Antecedentes.

Uno de los primeros pasos para el desarrollo de las metodologías de diseño AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) corresponde a la prueba de carreteras denominada “AASHO road test” la cual fue desarrollada por AASHO (American Association of State Highway Officials) entre los años 1958 a 1960 en Estados Unidos, Estado de Illinois, Ottawa. El desarrollo de esta prueba incluyó la construcción de tramos de carretera con diferentes espesores de pavimentos flexibles y pavimentos de concreto de cemento Pórtland. La prueba permitió evaluar la influencia de las cargas de tráfico en el desempeño del pavimento, considerando variables como, área de contacto entre llanta y pavimento, *módulo de reacción de subrasante*, espesores de subbase, otras.

Como resultado de esta investigación se desarrolló el documento “AASHO Interim Guide for the Design of Flexible Pavement Structures, 1961” y el documento “AASHO Interim Guide for the Design of rigid Pavement Structures, 1962”, en los cuales se considera por separado el análisis para pavimentos flexibles y rígidos. Posteriormente AASHTO actualizó y unificó ambos documentos en uno solo (el nombre AASHO fue cambiado a AASHTO) y producto de ello se presentó el documento “AASHTO Interim Guide for Design of Pavements Structures, 1972”, el cual a la fecha se ha venido actualizando de tal manera que los modelos de predicción del

comportamiento del pavimento puedan cada vez más ser calibrados tomando en cuenta condiciones particulares.

A continuación se presenta una breve descripción de la evolución de la metodología de diseño AASHTO hasta llegar al más reciente documento aprobado a la fecha de elaboración de este documento, el cual corresponde a “Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavements Structures, 1998”.

- En 1986 se presentó el documento “AASHTO Guide for Design of Pavements Structures”, en el cual se incluyeron nuevos conceptos como la confiabilidad, análisis de costos de ciclo de vida, entre otros.
- El documento: “AASHTO Guide for Design of Pavements Structures 1993”, contiene procedimientos de diseño similares a la edición AASHTO-1986. La principal diferencia entre ambos documentos está en el capítulo que trata sobre el diseño de sobrecapas, ya que se mejoran estos procedimientos de diseño siendo más fácil de utilizar y permite efectuar calibraciones al modelo, introduciendo datos que representen condiciones particulares.
- El documento: “Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavements Structures 1998” contiene un procedimiento alternativo para el diseño de pavimentos rígidos presentado en la versión 1993. El desarrollo de este procedimiento de diseño está basado en los resultados del proyecto: Soporte Bajo Pavimentos de Concreto de Cemento Pórtland, NCHRP 1-30 (Support Under Pórtland Cement Concrete Pavements), elaborado por el National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), para el cual se utilizó información disponible de la base de datos del programa: Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo (Long Term Pavement Performance, LTPP) tales como pérdida de soporte para el uso de diseño de pavimentos rígidos y datos para mejorar **la selección de módulos de reacción de la subrasante (k-value)**. Este proyecto fue validado y revisado por la Federal Highway Administration (FHWA) y adoptado por AASHTO.

La edición 1998 presenta un procedimiento de diseño que puede ser utilizado en lugar o de forma conjunta con la edición 1993, parte II, sección 3.2 Diseño de pavimento rígido y sección 3.3 Diseño de juntas de pavimento rígido. El modelo de diseño para la estimación de espesores de losa fue desarrollado y validado principalmente *para el tipo de pavimento de concreto con juntas simples (JPCP)*, a través del cual se obtienen espesores de losa y espaciamientos de juntas para controlar el desarrollo de esfuerzos por deformación térmica de losas y agrietamiento transversal, tomando en consideración condiciones de clima, tipo de base y subrasante.

El nuevo modelo estructural para el dimensionamiento de la losa presentado en la edición 1998 incluye, entre otros, las siguientes consideraciones:

- **Mejoras en la caracterización de la subrasante.**
- La capa base se considera como una capa estructural del pavimento.
- El espaciamiento de juntas transversales es utilizado como parámetro de entrada para la determinación de espesores de losa. Un aumento en el espaciamiento de juntas

transversales requiere de un incremento en el espesor de losa, especialmente para bases y subrasantes rígidas.

- Condiciones del clima de la zona donde se construirá el pavimento, son consideradas directamente para determinación del espesor de losa.
- Otros.

En el resto del documento se hace referencia a las metodologías de diseño AASHTO ediciones 1993 y 1998, las cuales están vigentes a la fecha de elaboración del presente trabajo.

4.0 Generalidades sobre el Módulo de reacción de la subrasante (k-value).

El Módulo de reacción de la subrasante (k-value) fue presentado por Westergaard, en 1926 en su publicación: Esfuerzos en pavimentos de concreto calculados por análisis teóricos (“Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis”), en la cual presentó un método aproximado para el cálculo de esfuerzos en la losa de concreto, basado en la suposición de que la subrasante no trasmite esfuerzos de corte, y que la reacción de la subrasante sobre la losa es igual a la deflexión de la subrasante multiplicada por una constante “k” a la cual Westergaard llamó Módulo de reacción de la subrasante [1]. Ver figura No.1.

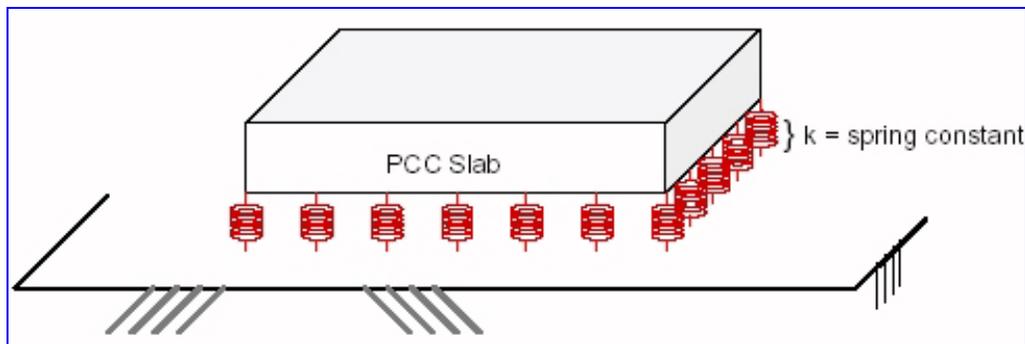


Figura No.1: Modelo de resorte elástico, propuesto por Westergaard, para determinar la reacción del suelo sobre la losa de concreto.

Fuente: Página de Internet:

http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/04_design_parameters/04-2_body.htm

Westergaard estableció que el k-value es determinado a través del ensayo de placa de carga utilizando una placa estándar de 30 pulgadas de diámetro.

El k-value es retomado por AASHTO-1993 y AASHTO-1998 como parámetro de entrada para el diseño de pavimentos rígidos, el cual caracteriza la capacidad de respuesta estructural proporcionada por la subrasante al sistema de pavimento.

De acuerdo con lo indicado en AASHTO-1993, Volumen II, Apéndice HH, el k-value es una constante elástica que define la rigidez del material o resistencia a la deformación.

La Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (American Society for Testing and Materials, ASTM) define el k-value como la relación entre: (1) la carga por unidad de área de superficie horizontal de una masa de suelo con (2) el correspondiente asentamiento de la superficie. El k-value es determinado como la pendiente de la secante dibujada entre el punto correspondiente a cero asentamiento y el punto correspondiente a 0.05 pulgadas de asentamiento de la curva carga-asentamiento, obtenida del ensayo de placa de carga sobre un suelo usando una placa de carga de 30 pulgadas de diámetro o mayor [2].

La guía AASHTO-1998, establece que el diámetro de placa que deberá ser utilizado para determinar el k-value, es de 30 pulgadas y que el uso de placas de diámetro menor pueden dar como resultado valores de k-value mayores, los cuales no se consideran adecuados para ser utilizados como parámetro de entrada en este método de diseño.

A continuación se presenta un resumen del procedimiento establecido por cada una de las metodologías AASHTO-1993 y AASHTO-1998, para la determinación de k-value efectivo utilizado como parámetro de entrada de diseños de pavimentos de concreto de cemento Portland con juntas simples (JPCP).

5.0 Determinación del k-value efectivo de acuerdo con AASHTO-1993.

Para la determinación del k-value efectivo, son necesarios los siguientes pasos:

5.1. Seleccionar valores de módulo de resiliencia de la subrasante (M_R) para cada estación climática anual.

Se deberán desarrollar ensayos de laboratorio para determinar los valores de M_R de la subrasante en muestras representativas para cada estación climática de acuerdo con AASHTO T 274¹ Método de Ensayo Estándar para la Determinación del Módulo de Resiliencia de Materiales Bases/Subbases Granulares no Ligadas y Suelos de Subrasante (Standard Method of the Test for Determining the Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils). Alternativamente la guía establece que el M_R para cada estación climática puede ser determinado utilizando correlaciones con propiedades del suelo, por ejemplo, Índice de plasticidad, humedad, entre otros. El propósito de determinar el M_R de la subrasante para cada estación climática es el de cuantificar el daño relativo que sufre el pavimento por el efecto de cada estación.

La guía presenta dos (2) procedimientos para la determinación de la variación estacional del M_R , uno de ellos se basa en la obtención de correlaciones entre resultados de M_R obtenidos en el laboratorio y diferentes contenidos de humedad de la subrasante, de esta manera se podrán obtener valores de M_R a partir de valores de humedad de la subrasante tomadas in-situ, para cada estación climática. El otro procedimiento se basa en la obtención del M_R para cada estación climática utilizando ensayos de deflexión y retrocálculo realizados sobre pavimentos en servicio.

5.2. Seleccionar los valores de módulo elástico de la subbase (ESB) para cada estación climática anual.

El procedimiento para la estimación del módulo elástico estacional de la subbase (ESB) depende del tipo de material de subbase a ser utilizado. Para materiales con rigidez relativamente baja, por ejemplo algunos suelos naturales y materiales granulares no ligados, el ESB deberá ser determinado de acuerdo con AASHTO T 274¹ Método de Ensayo Estándar para la Determinación del Módulo de Resiliencia de Materiales Bases/Subbases Granulares no Ligadas y Suelos de Subrasante (Standard Method of the Test for Determining the Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils). Para materiales ligados o de alta rigidez el ESB puede ser determinado a través del ensayo ASTM D 4123, Método de Ensayo Estándar para Ensayo de Tensión Indirecta para Módulos de Resiliencia de Mezclas Bituminosas (Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures); sin embargo para materiales con rigidez muy alta, tales como materiales con altos contenidos de cemento Pórtland, la guía recomienda determinar el ESB de acuerdo con ASTM C 469 Método de ensayo Estándar para Módulos de Elasticidad Estáticos y Relación de Piosson's de Concreto en Compresión (Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression)

5.3. Determinación de los módulos de reacción de subrasante combinados para cada estación climática anual.

En este paso se determina el valor de soporte proporcionado a la losa de concreto por el efecto combinado de la subrasante y del material de subbase para cada estación climática, asumiendo un espesor de subrasante homogénea semi-infinita con espesor de al menos 3 m debajo de la superficie de la subrasante.

El módulo de reacción combinado es obtenido con base en el nomograma presentado en la figura No.2, en el cual se tienen como valores de entrada el espesor y el módulo elástico de la subbase (D_{SB} , E_{SB}); así como el módulo de resiliencia de la subrasante (M_R).

¹ Este método de ensayo fue remplazado por AASHTO T307, Método de Ensayo Estándar para la Determinación del Módulo de Resiliencia de suelos y Materiales Agregados (Standard Method of the Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials), en el año de 1999.

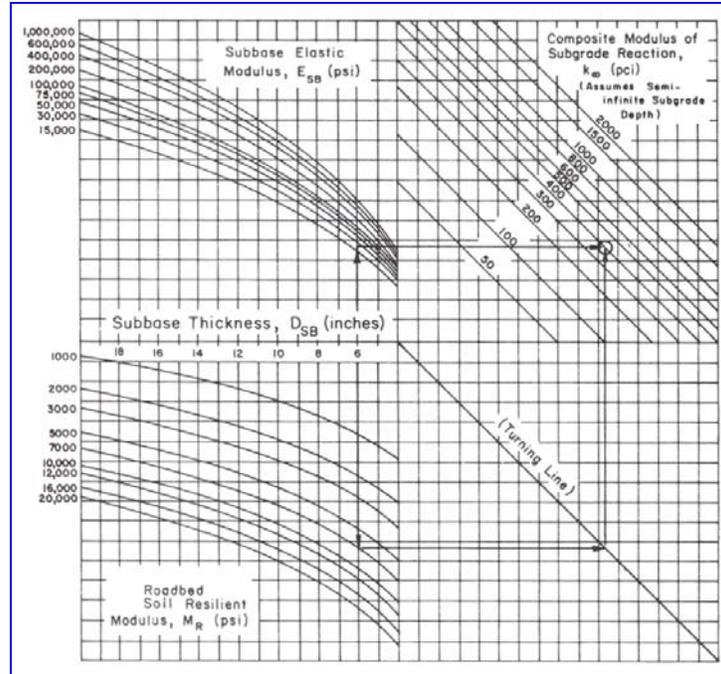


Figura No.2: Nomograma utilizado para la determinación del k-value combinado.
Fuente: Guía de diseño AASHTO-1993, tomo I.

En el caso que el sistema estructural del pavimento no considere el uso de una capa de subbase y por consiguiente la losa de concreto se apoye directamente sobre la subrasante, el módulo de reacción combinado es obtenido usando la siguiente relación teórica establecida entre k-values obtenidos de ensayos de placa de carga y M_R :

$$k = \frac{M_R}{19.4} \tag{1}$$

Donde:

k = Módulo de reacción combinado de la subrasante, (psi/pulgada).

M_R = Módulo de resiliencia de la subrasante, (psi).

5.4. Determinación del k-value el cual incluye los efectos de una capa rígida poco profunda.

En este paso se determina el k-value que incluye los efectos de una capa rígida (por ejemplo un estrato de roca) poco profunda ubicada a una profundidad menor o igual a 3 m medida desde la superficie de la subrasante. Ver figura No.3.

El k-value que incluye los efectos de una capa rígida poco profunda se determina utilizando el nomograma presentado en la figura No.4, en el cual se tiene como valores de entrada el M_R ,

profundidad a la capa rígida y el módulo de reacción de la subrasante combinado para cada estación climática.

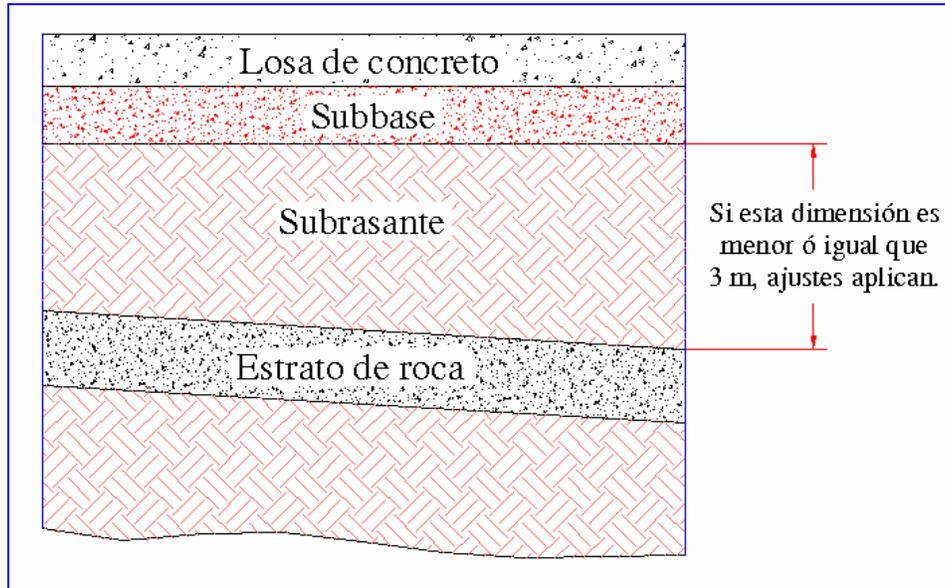


Figura No.3: Esquema que presenta el caso en que es necesario efectuar ajustes en el k-value por la presencia de una capa rígida poco profunda.

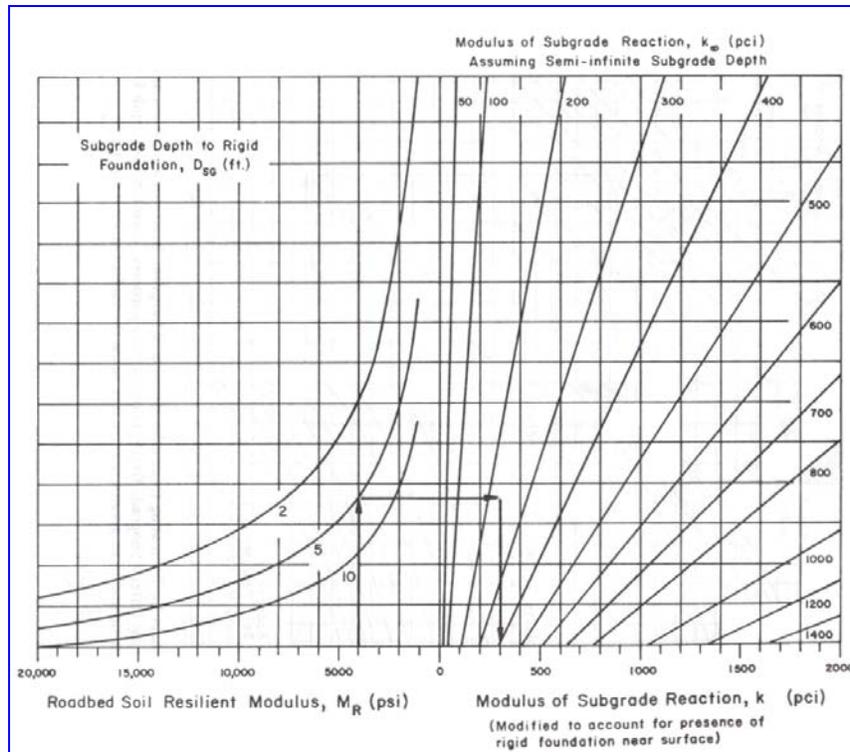


Figura No.4: Nomograma utilizado para determinar el k-value corregido por efectos de una capa rígida poco profunda.
Fuente: Guía de diseño AASHTO-1993, tomo I.

5.5. Determinación del daño relativo para cada estación climática.

El daño relativo estacional (u_r) se determina utilizando el nomograma presentado en la figura No.5, en el cual se tienen como valores de entrada el k-value compuesto afectado por la presencia de una capa rígida poco profunda y el espesor de losa preliminar asumido para efectos de estimación del k-value.

Luego de obtener el u_r , se determina el daño relativo estacional promedio (\bar{u}_r) sumando todos los valores de u_r estacionales y dividiéndolos entre el número estaciones climáticas consideradas. Empleando el valor de \bar{u}_r se determina el módulo de reacción de la subrasante efectivo, haciendo uso del mismo nomograma de la figura No.5; en este caso se utiliza en sentido contrario al utilizado anteriormente.

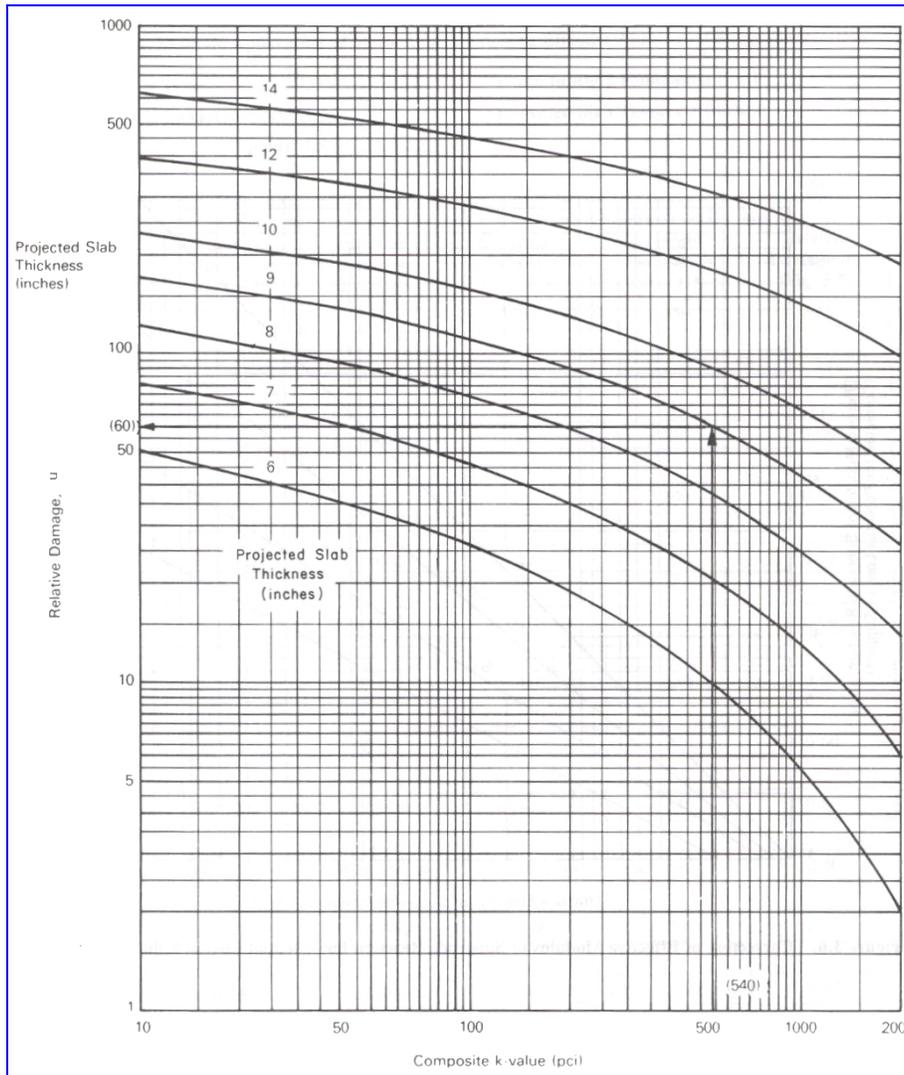


Figura No.5: Nomograma utilizado para la determinación del daño relativo.

Fuente: Guía de diseño AASHTO-1993, tomo I.

5.6. Ajustar el k-value efectivo por pérdida de soporte de la subbase.

El factor de pérdida de soporte (LS) es un factor que representa la pérdida potencial de soporte ocasionado por la erosión de la subbase y/o movimientos verticales diferenciales de la subrasante. En primer lugar se debe estimar el valor de LS para el tipo de subbase a utilizar en el diseño. En la figura No.6 se presenta un cuadro que contiene rangos de valores de LS para diferentes tipos de materiales de subbase.

Finalmente para obtener el k-value efectivo a utilizar en el diseño de pavimento, se hace uso del nomograma de la figura No.7.

Type of Material	Loss of Support (LS)
Cement Treated Granular Base (E = 1,000,000 to 2,000,000 psi)	0.0 to 1.0
Cement Aggregate Mixtures (E = 500,000 to 1,000,000 psi)	0.0 to 1.0
Asphalt Treated Base (E = 350,000 to 1,000,000 psi)	0.0 to 1.0
Bituminous Stabilized Mixtures (E = 40,000 to 300,000 psi)	0.0 to 1.0
Lime Stabilized (E = 20,000 to 70,000 psi)	1.0 to 3.0
Unbound Granular Materials (E = 15,000 to 45,000 psi)	1.0 to 3.0
Fine Grained or Natural Subgrade Materials (E = 3,000 to 40,000 psi)	2.0 to 3.0

Figura No.6: Rango de valores de pérdida de soporte para diferentes materiales.

Fuente: Guía de diseño AASHTO-1993, tomo I.

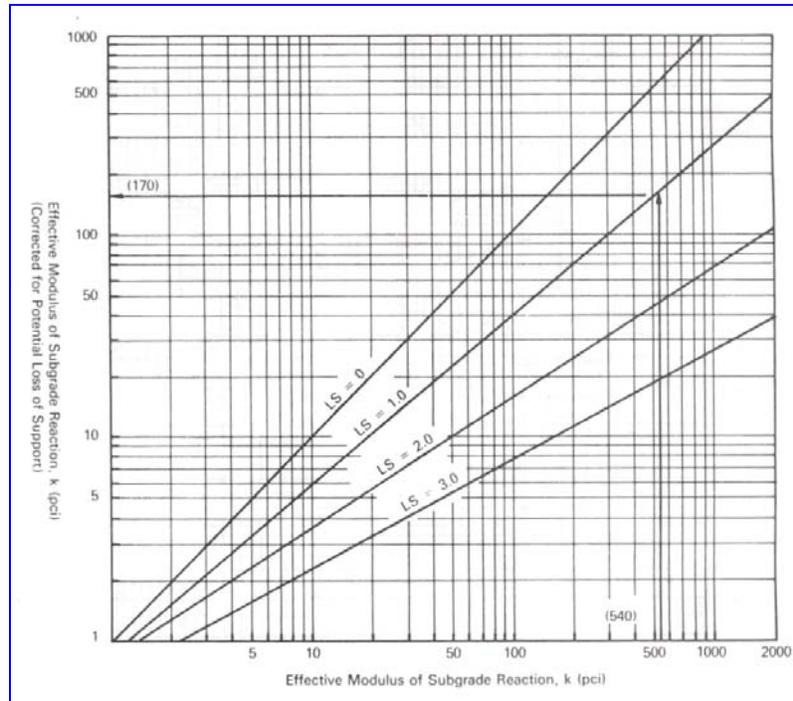


Figura No.7: Nomograma que permite obtener el k-value efectivo en función de factor de pérdida de soporte.

Fuente: Guía de diseño AASHTO-1993, tomo I.

6.0 Determinación del k-value efectivo de acuerdo con AASHTO-1998.

Para la determinación del k-value efectivo, son necesarios los siguientes pasos:

6.1. Seleccionar un k-value para cada estación climática.

El número de estaciones climáticas así como su duración, dependen del clima de la zona donde será construido el pavimento. Entre los factores que deben ser considerados para la selección del k-value para cada estación climática, se mencionan los siguientes:

- Variación del nivel freático.
- Niveles de precipitación de lluvia.
- Número de ciclos de hielo y deshielo (No aplica para el El Salvador, dado que no se tienen estas condiciones de temperaturas extremas).

La variación del grado de saturación de los suelos es muy difícil predecir, sin embargo en lugares donde el nivel freático se encuentra de manera permanente a profundidades menores de alrededor de 3 m desde la superficie de la subrasante, es razonable esperar niveles de saturación entre 70%-90% para suelos de grano fino, tomando en consideración que estos suelos pueden llegar a presentar niveles de saturación cercanos al 100% para los períodos de lluvia.

A continuación se presenta un resumen de los métodos recomendados por la guía para la determinación de k-value para cada estación climática.

6.1.1. Correlaciones con el tipo de suelo y otras propiedades o ensayos.

Este método consiste en la selección de un k-value basado en los siguientes datos:

- Clasificación de suelos,
- Nivel de contenido de humedad,
- Densidad,
- Relación de soporte de California (CBR), o
- Datos de Penetrómetro dinámico de cono (DCP)

Correlaciones para suelos clasificados como cohesivos o de grano fino (Suelos clasificados según AASHTO como A-4 hasta A-7)

La capacidad de carga de los suelos cohesivos es altamente influenciada por el grado de saturación que posean (S_r), el cual es función de su contenido de agua (w), densidad seca (γ) y la gravedad específica de los sólidos del suelo (G_s). El grado de saturación (S_r) puede obtenerse utilizando la siguiente relación:

$$S_r = \frac{w}{(62.4/\gamma) - (1/G_s)} \quad (2)$$

Donde:

S_r = Grado de saturación del suelo (%).

w = Contenido de agua, (%).

γ = Densidad seca, (lb/pie³).

G_s = Gravedad específica de los sólidos del suelo, (adimensional).

En la figura No.8 se presentan valores recomendados de k-value para los suelos clasificados como cohesivos, en función del grado de saturación.

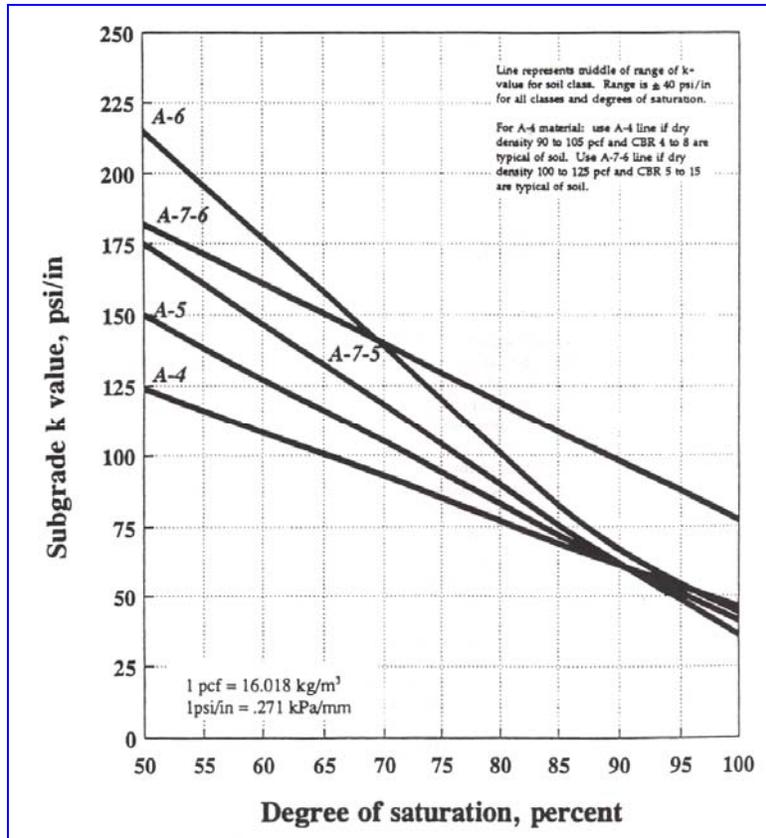


Figura No.8: Nomograma que permite la obtención del k-value en función del tipo de suelo y su correspondiente grado de saturación.

Fuente: Guía de diseño AASHTO-1998.

En la figura No.8, cada línea representa valores medios de un rango de valores razonables de k-value; para cada tipo de suelo y grado de saturación. Se observa que de todas las clasificaciones de suelos contenidos en la figura, los clasificados como A-4 son los menos influenciados por el cambio en su grado de saturación, esto se debe principalmente a que dentro esta clasificación pueden existir mezclas de limo, arena y hasta partículas de grava; estas partículas de grano grueso son menos susceptibles a los cambios en los contenidos de agua. En caso contrario, los materiales A-6 y A-7 que son materiales compuestos por limos de baja a alta compresibilidad y arcillas de baja y alta plasticidad, son mucho más susceptibles a la saturación de agua.

Correlaciones para suelos clasificados como grano grueso (Suelos clasificados según AASHTO como A-1 hasta A-3)

La capacidad de carga de los suelos de grano grueso es bastante insensible a la variación en el contenido de agua. Una propiedad que afecta predominantemente la capacidad de carga de estos suelos es su relación de vacíos. Rangos de valores de k-value para suelos de grano grueso en función del tipo de suelo y rangos típicos de densidad seca y CBR se presentan en la figura No.9.

Correlaciones de k-value con valores de Relación de soporte de California.

En la figura No.10 se presenta rango aproximado de valores de k-value que pueden esperarse para un suelo con un valor dado de CBR.

Correlaciones de k-value con la razón de penetración obtenido con el Penetrómetro dinámico de cono.

En la figura No.11 se presenta rango aproximado de valores de k-value en función de la razón de penetración dada (pulgadas por golpe), obtenida con el equipo Penetrómetro dinámico de cono (DPC).

6.1.2. Ensayos de deflexión y retroanálisis (método recomendado).

Estos métodos se basan en la medición de deflexiones de una superficie de pavimento como resultado de la aplicación de una carga de impulso definida, la cual es aplicada a la superficie de pavimento. Las deflexiones resultantes son medidas en el centro de aplicación de la carga y en puntos espaciados radialmente hacia afuera desde el punto de aplicación de la carga.

Las deflexiones obtenidas pueden utilizarse para determinar el k-value para el diseño de sobrecapas de pavimentos existentes, para el diseño de reconstrucciones de pavimentos sobre alineamientos existentes o para el diseño de pavimentos nuevos similares ubicados en zonas donde existe el mismo tipo de subrasante. La medición de las deflexiones debe efectuarse a lo largo del proyecto a intervalos adecuados para evaluar las condiciones del material existente; pueden utilizarse intervalos de entre 30 a 300 m.

El k-value obtenido por este método no requiere ser ajustado por la presencia de capas rígidas poco profundas, debido a que la influencia de estas capas, si existen, esta presente en los resultados de deflexión obtenidos; pero el k-value dinámico determinado por el retroanálisis requiere ser reducido por un factor de aproximadamente 2 para estimar el k-value estático que es el valor utilizado para el diseño.

Para el cálculo del k-value, la guía de diseño recomienda utilizar una magnitud de carga de 9,000 lbf y medir las deflexiones con sensores ubicados a 0, 8, 12, 18, 24, 36 y 60 pulgadas, desde el centro de aplicación de la carga. Ver figura No.12

Los parámetros sobre los que se basa el cálculo del k-value son la deflexión máxima obtenida en el punto de aplicación de la carga y la estimación de áreas del cuenco de deflexiones; estos valores son relacionados con el radio de rigidez efectivo y efectuando algunas consideraciones se obtiene el k-value dinámico.

Debe tomarse en cuenta que los ensayos de deflexión deben desarrollarse para cada estación climática, para considerar la influencia de las condiciones ambientales en el k-value.

AASHTO class	Description	Unified class	Dry density (lb/ft ³)	CBR (percent)	k-value (psi/in)
Coarse-grained soils:					
A-1-a, well graded	gravel	GW, GP	125 - 140	60 - 80	300 - 450
A-1-a, poorly graded			120 - 130	35 - 60	300 - 400
A-1-b	coarse sand	SW	110 - 130	20 - 40	200 - 400
A-3	fine sand	SP	105 - 120	15 - 25	150 - 300
A-2 soils (granular materials with high fines):					
A-2-4, gravelly	silty gravel	GM	130 - 145	40 - 80	300 - 500
A-2-5, gravelly	silty sandy gravel				
A-2-4, sandy	silty sand	SM	120 - 135	20 - 40	300 - 400
A-2-5, sandy	silty gravelly sand				
A-2-6, gravelly	clayey gravel	GC	120 - 140	20 - 40	200 - 450
A-2-7, gravelly	clayey sandy gravel				
A-2-6, sandy	clayey sand	SC	105 - 130	10 - 20	150 - 350
A-2-7, sandy	clayey gravelly sand				
Fine-grained soils:					
A-4	silt	ML, OL	90 - 105	4 - 8	25 - 165 *
	silt/sand/ gravel mixture		100 - 125	5 - 15	40 - 220 *
A-5	poorly graded silt	MH	80 - 100	4 - 8	25 - 190 *
A-6	plastic clay	CL	100 - 125	5 - 15	25 - 255 *
A-7-5	moderately plastic elastic clay	CL, OL	90 - 125	4 - 15	25 - 215 *
A-7-6	highly plastic elastic clay	CH, OH	80 - 110	3 - 5	40 - 220 *

Figura No.9: Rangos de k-value para varios tipos de suelo.

Fuente: Guía de diseño AASHTO-1998.

* Valores de k-value para los suelos de grano fino están en función de su grado de saturación.

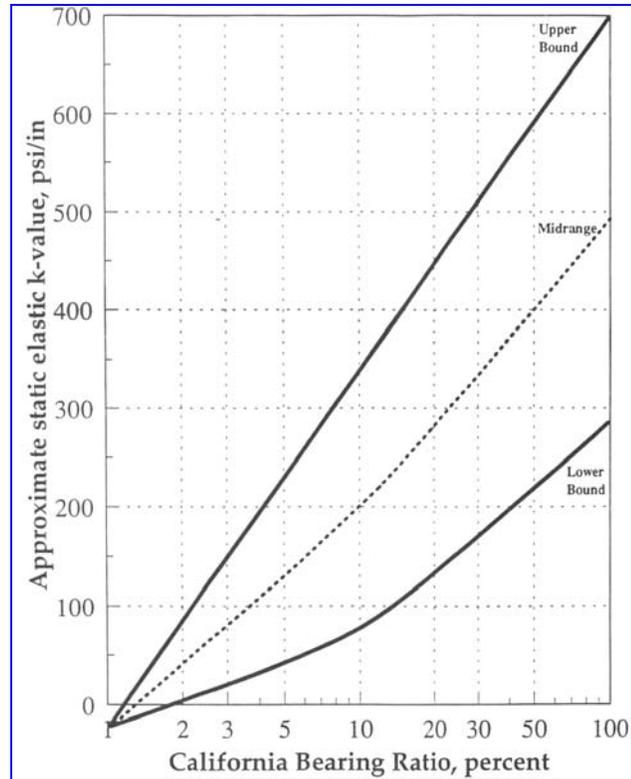


Figura No.10: Nomograma que permite la obtención de k-value en función del CBR.
Fuente: Guía de diseño AASHTO-1998.

6.1.3. Ensayos de placa de carga.

Dado que para propósito del diseño de pavimentos de concreto, el parámetro de entrada es el k-value estático, este valor puede determinarse utilizando los tipos de ensayos de placa de carga indicados a continuación:

Ensayos repetitivos

- AASHTO T 221, Método de Ensayo Estándar para el Ensayo de Placa de Carga Estático Repetitivo de Suelos y Componentes de Pavimento Flexible para uso en Evaluaciones y Diseños de Pavimentos de Aeropuertos y Carreteras (Standard Method of Test for Repetitive Static Plate Load Test of Soils and Flexible Pavement Components for use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements)
- ASTM D 1195, Método de Ensayo Estándar para Ensayos de Placa de Carga Estático Repetitivo de Suelos y Componentes de Pavimento Flexible para uso en Evaluaciones y Diseños de Pavimentos de Aeropuertos y Carreteras (Standard Test Method for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements)

Ensayos no repetitivos

- AASHTO T 222, Método de Ensayo Estándar para el Ensayo de Placa de Carga Estático no Repetitivo de Suelos y Componentes de Pavimento Flexible para uso en Evaluaciones y

Diseños de Pavimentos de Aeropuertos y Carreteras (Standard Method of Test for Nonrepetitive Static Plate Load Test of Soils and Flexible Pavement Components for use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements)

- ASTM D 1196, Método de Ensayo Estándar para Ensayos de Placa de Carga Estático no Repetitivo de Suelos y Componentes de Pavimento Flexible para uso en Evaluaciones y Diseños de Pavimentos de Aeropuertos y Carreteras (Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements)

Estos ensayos deberán realizarse sobre la subrasante preparada o sobre el relleno terminado; tomando en consideración que en este último caso el espesor del relleno debe ser al menos 3 m. En caso contrario el ensayo deberá realizarse sobre el material de subrasante y ajustar el k-value obtenido por la presencia del relleno, considerando su espesor y densidad, tal como se detallará más adelante.

En el caso de un ensayo de placa de carga repetitivo, el k-value es determinado por la relación entre la carga y la deformación elástica (porción recuperable del total de la deformación medida). Para el caso de un ensayo de placa de carga no repetitivo, la guía recomienda calcular el k-value como la relación entre la carga y la deformación a una deformación de 0.05 pulgadas, ya que a esta deformación se considera representativo el k-value elástico. En la figura No.13 se presenta información sobre el equipo utilizado en ensayos de placa de carga no repetitivo.

Es importante mencionar que para determinar el k-value elástico estático, utilizando ensayos de placa de carga, la guía establece que el diámetro de la placa de soporte debe ser de 30 pulgadas. Placas de menor diámetro no son adecuadas para su uso en el diseño, debido a que podrían obtenerse valores de k-value mayores.

Al igual que en el método de deflexión y retroanálisis, el valor de k-value obtenido de ensayos de placa de carga no requiere ser ajustado por la presencia de una capa de material rígido poco profundo, debido a que su influencia esta presente en los resultados del ensayo.

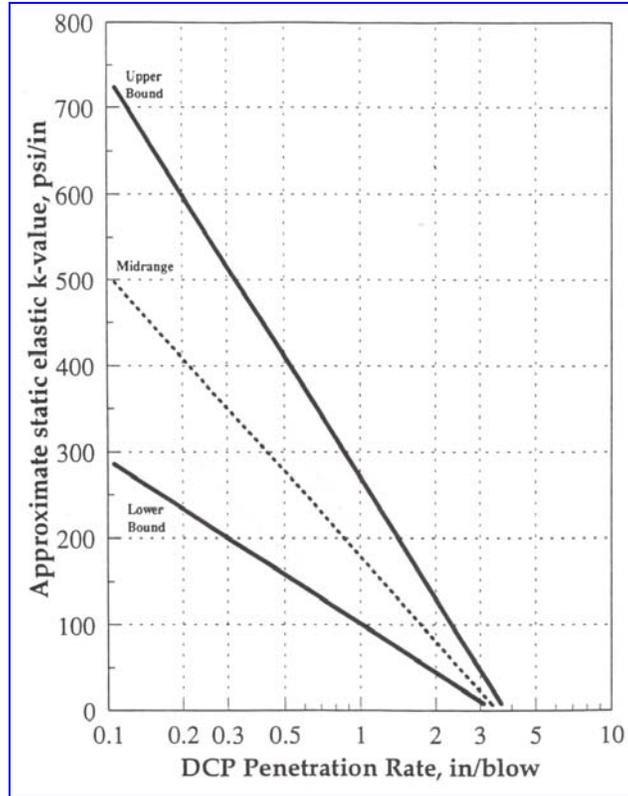


Figura No.11: Nomograma utilizado para determinar el k-value en función de la razón de penetración obtenida con el equipo Penetrometro dinámico de cono (DPC).
Fuente: Guía de diseño AASHTO-1998.

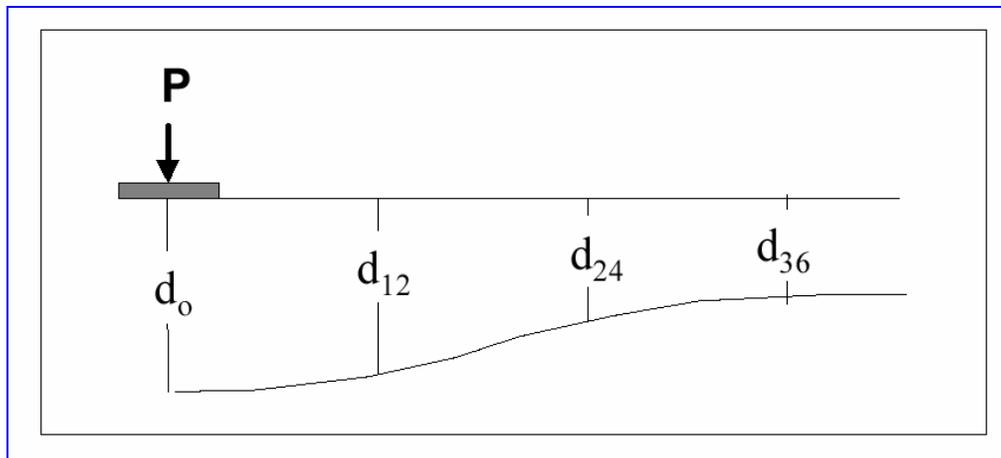


Figura No.12: Cuenco típico de deflexiones verticales obtenidas en un ensayo de deflexión.
Fuente: Uso del Deflectómetro de Impacto para la Evaluación Estructural de Recapados Asfálticos sobre Pavimentos de Hormigón.

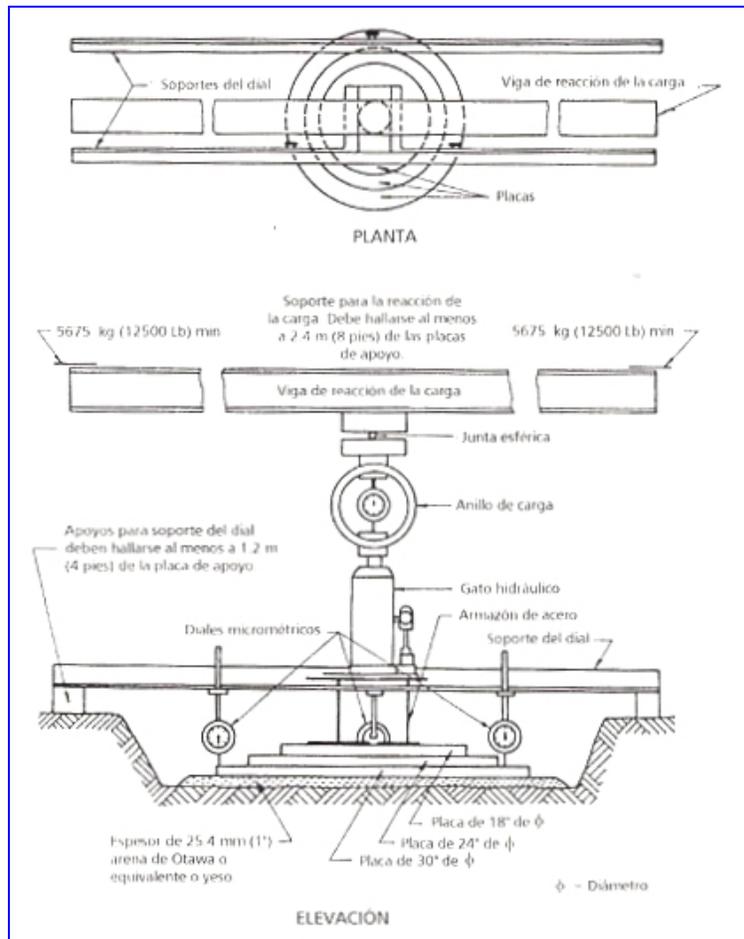


Figura No.13: Equipo utilizado para ensayos de placa de carga.

Fuente: AASHTO T 222, Método de Ensayo Estándar para el Ensayo de Placa de Carga Estático no Repetitivo de Suelos.

6.2. Determinación del k-value efectivo.

El k-value efectivo es el valor que será utilizado en el diseño de pavimento, el cual está determinado por la combinación de los k-values obtenidos para cada estación climática. El k-value efectivo es definido como el daño en el k-value causado por la fatiga originada por el número de aplicaciones de carga de ejes equivalentes de 18, 000 lb y la variación climática en un año.

6.3. Ajustar el k-value efectivo, por los efectos de una capa rígida poco profunda (por ejemplo un estrato de roca) y/o un relleno construido arriba de la subrasante (si esta presente).

Dado que el k-value efectivo corresponde a capas de subrasante homogéneas con un espesor de al menos 3 m, en el caso que exista una capa superficial de suelo con espesor menor a 3 m (por

ejemplo un relleno) y debajo de este material exista un material de menor calidad, el k-value deberá obtenerse de este material de abajo y el valor obtenido deberá ajustarse por la influencia del material superficial. De igual manera en el caso que exista una capa rígida (por ejemplo un estrato de roca) ubicada a una profundidad de 3 m o menos debajo de la superficie de la subrasante, se deberán efectuar ajustes en el k-value. En la figura No.14 se presenta un esquema que expone los casos donde es necesario efectuar estos ajustes y en la figura No.15 se presenta un nomograma donde es posible obtener como dato de salida k-values ajustados, introduciendo el k-value objeto del ajuste, la profundidad desde la superficie de la subrasante hasta la capa rígida y el espesor y densidad del relleno.

Es importante hacer notar que los ajustes en el k-value por la influencia de una capa rígida poco profunda, deberán ser aplicados si el k-value fue determinado a través de correlaciones. En casos donde el k-value fue obtenido utilizando métodos de deflexión o de ensayos de placa de carga, el efecto de una capa rígida que se encuentre ubicada a una profundidad menor de 3 m, ya está presente en los resultados obtenidos.

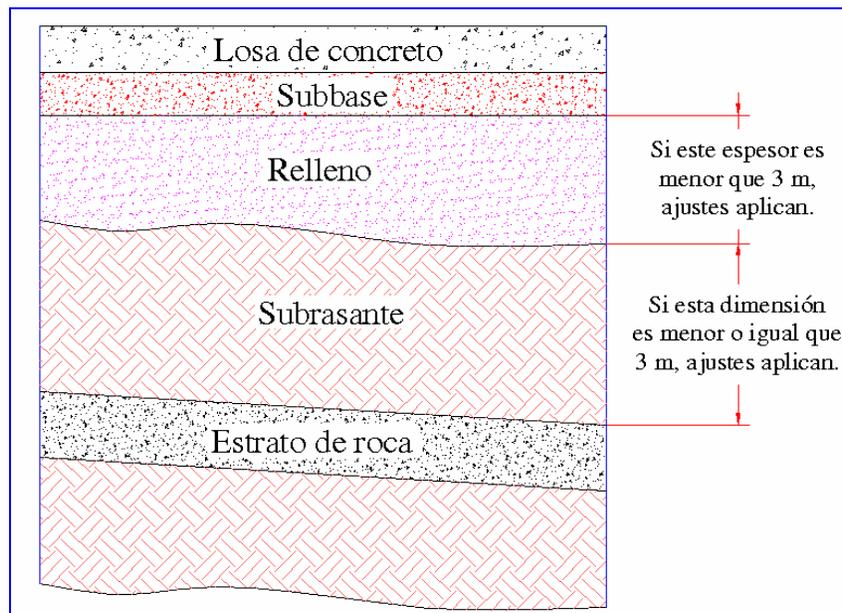


Figura No.14: Esquema sin escala que expone los casos donde es necesario efectuar ajustes en el k-value por la presencia de un relleno y/o una capa rígida poco profunda.

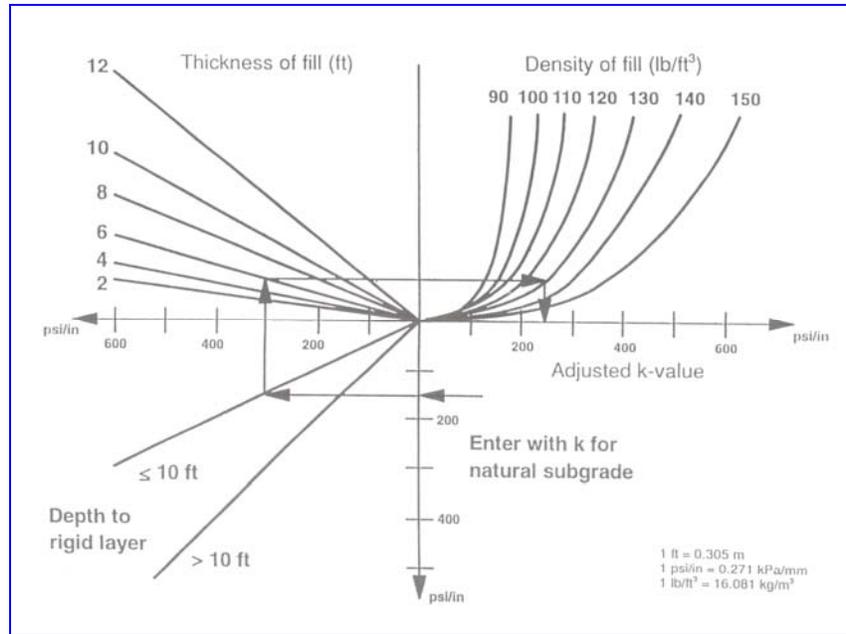


Figura No.15: Nomograma utilizado para determinar el k-value corregido por efectos de una capa rígida poco profunda y/o relleno.

Fuente: Guía de diseño AASHTO-1998.

7.0 Incidencia del parámetro k-value en el espesor de la losa de concreto.

El análisis fue desarrollado con base en AASHTO-1993 y AASHTO-1998, para pavimentos nuevos de concreto con juntas simples (JPCP) con dispositivos mecánicos de transferencia de carga en juntas transversales (dovelas), utilizando programas de computadora basados en las mencionadas metodologías de diseño. Se utilizó el programa: PAVEMENT ANALYSIS SOFTWARE (PAS) elaborado por American Concrete Pavement Association (ACPA), el cual está basado en la metodología AASHTO-1993 y el programa: RIGID PAVEMENT DESIGN (RPD), elaborado por U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA), el cual está basado en la guía de diseño AASHTO-1998.

Para el desarrollo del análisis se consideraron parámetros de diseño razonablemente representativos de las condiciones imperantes en El Salvador; esto incluye propiedades mecánicas de materiales, condiciones de tráfico, condiciones ambientales, entre otros. El análisis fue desarrollado efectuando varias corridas en los mencionados programas de computadora, considerando como única variable el k-value efectivo.

Los parámetros de entrada para cada metodología de diseño, se escogieron de manera que representen condiciones similares, con el propósito de obtener un orden de idea sobre la variación de espesores de losa obtenidos de cada metodología. En la figura No.16 se presenta información sobre la estructura de pavimento sobre la cual se efectuó el análisis.

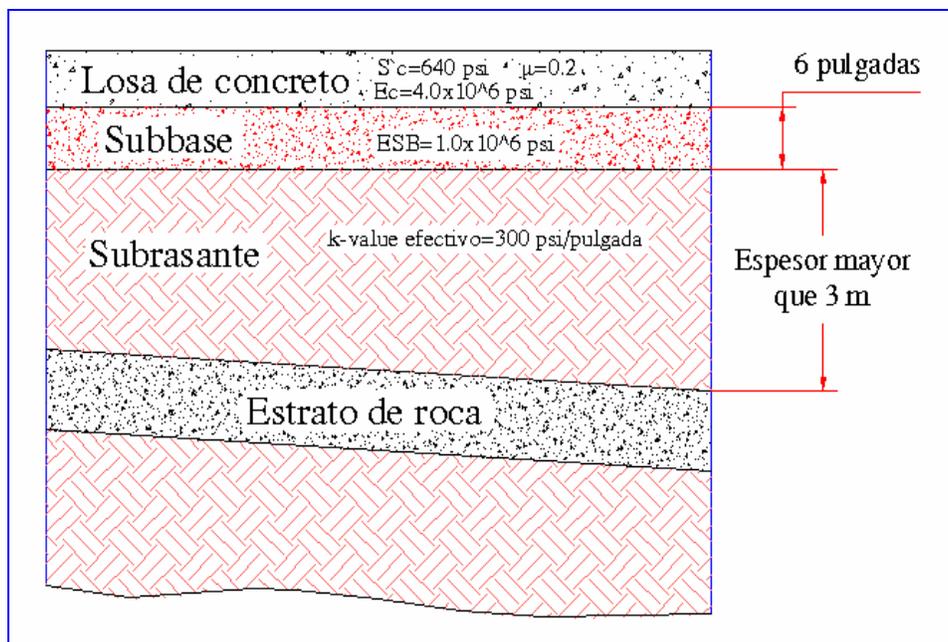


Figura No.16: Esquema sin escala, que presenta información sobre la estructura de pavimento y condiciones de fundación, con base en las cuales se desarrolló el análisis de incidencia del parámetro k-value en el espesor de losa.

El k-value efectivo utilizado fue de 300 psi/pulgada, obtenido de la figura No.9 y corresponde a un material clasificado como Arena Limosa (Suelo clasificado según AASHTO como A-2-4), el cual es característico del subsuelo de la ciudad de San Salvador. El material de subbase corresponde a una grava tratada con cemento Pórtland, para el cual se consideró un ESB de 1.0×10^6 psi, y fue obtenido de la figura No.6.

Las propiedades mecánicas del concreto de cemento Pórtland, para la losa, corresponden a un concreto de peso normal cuyas propiedades mecánicas corresponden a: módulo de elasticidad $E_c = 4,000,000$ psi, módulo de ruptura $S'_c = 640$ psi y relación de Poisson's $\mu = 0.20$.

A continuación se presenta por separado los parámetros de diseño utilizados para cada una de las metodologías:

- Análisis utilizando AASHTO-1993**

ESALs, W_{18}	: 14,000,000
Nivel de confiabilidad, R , (%)	: 90
Desviación estándar, S_o	: 0.35
Serviviabilidad inicial, P_1	: 4.5
Serviviabilidad final, P_2	: 2.5
k-value efectivo combinado (psi/pulgada)	: 650
Módulo de ruptura del concreto, S'_c , (psi)	: 640
Módulo de elasticidad del concreto, E_c , (psi)	: 4.0×10^6
Coefficiente de transferencia de carga, J	: 2.8
Coefficiente de drenaje, C_d	: 1.1

- Análisis utilizando AASHTO-1998

ESALs, W_{18}	: 14,000,000
Nivel de confiabilidad, R, (%)	: 90
Desviación estándar, S_o	: 0.35
Serviviabilidad inicial, P1	: 4.5
Serviviabilidad final, P2	: 2.5
k-value efectivo (psi/pulgada)	: 300
Módulo de ruptura del concreto, $S'c$, (psi)	: 640
Módulo de elasticidad del concreto, E_c , (psi)	: 4.0×10^6
Relación de Poisson's del concreto, μ	: 0.20
Espaciamiento de juntas, L, (pies)	: 16
Módulo de elasticidad de la base, E_b , (psi)	: 1.0×10^6
Coefficiente de fricción losa/base, f	: 34
Espesor de la base, H_b , (pulgadas)	: 6
Temperatura promedio anual, TEMP, (°F)	: 75.2
Velocidad del viento media anual, WIND, (mph)	: 5
Precipitación de lluvia media anual, PRECIP, (pulgadas)	: 68
Factor de soporte lateral	: 0.94

7.1. Resultados obtenidos.

7.1.1. Metodología AASHTO-1993.

Un resumen de los resultados obtenidos del programa PAS se presenta en la tabla No.1

Tabla No.1, Resumen de resultados obtenidos del programa PAS

k-value efectivo (%)	k-value efectivo (combinado)(psi/pulgada)	Espesor de losa (pulgadas)	Variación en el espesor de losa con respecto al 100% de k-value efectivo (%)
200	1,300	7.48	11.3
170	1,000	7.92	6.1
150	900	8.07	4.3
120	800	8.21	2.6
100	650	8.43	0.0
80	600	8.51	1.0
50	380	8.89	5.5
30	240	9.18	8.9

Con base en los resultados obtenidos y mostrados en la tabla No.1, se hacen los siguientes comentarios:

- El espesor de losa obtenido con el valor k-value al 100% fue 8.43 pulgadas.
- El espesor de losa es inversamente proporcional al k-value. A medida que los k-values aumentan, se obtuvo una reducción en el espesor de losa y en el caso contrario a medida que los k-values fueron disminuidos, se obtuvo un aumento en el espesor de losa.
- El espesor de losa es levemente afectado por importantes cambios en el k-value. Por ejemplo, para el caso en el cual el k-value fue reducido en un 50% se obtuvo un aumento en el espesor de losa de 0.46 pulgadas (± 1.17 cm), lo cual representa una variación del 5.5%. Considerando como única variable el espesor de losa, este incremento equivale aproximadamente a un aumento en el orden de 4.5 millones de ejes equivalentes (ESALs) previstos.

Metodología AASHTO 1998

Un resumen de los resultados obtenidos del programa RPD se presenta en la siguiente tabla:

Tabla No.2, Resumen de resultados obtenidos del programa RPD

k-value efectivo (%)	Espesor de losa (pulgadas)	Variación en el espesor de losa con respecto al 100% de k-value efectivo (%)
200	12.27	7.2
170	12.06	5.3
150	11.90	3.9
120	11.64	1.7
100	11.45	0.0
80	11.22	2.0
50	10.73	6.3
30	10.15	11.4

Con base en los resultados obtenidos y mostrados en la tabla No.2 se hacen los siguientes comentarios:

- El espesor de losa obtenido con el valor k-value al 100% fue 11.45 pulgadas.
- El espesor de losa es directamente proporcional al k-value. A medida que los k-values aumentan, se obtuvo un aumento en el espesor de losa y en el caso contrario a medida que los k-values fueron disminuidos, se obtuvo una disminución en el espesor de losa.
- El espesor de losa es levemente afectado por importantes cambios en el k-value. Por ejemplo, para el caso en el cual el k-value se redujo en un 50%, se obtuvo una reducción en el espesor de losa de 0.72 pulgadas (± 1.83 cm), lo cual representa una variación del 6.3%. Considerando como única variable el espesor de losa, esta disminución equivale aproximadamente a una reducción en el orden de 4.8 millones de ejes equivalentes (ESALs) previstos.

En las figuras No.17 y 18 se presentan gráficas que relacionan los espesores de losa obtenidos con la variación en el k-value para cada metodología y en la figura No.19 se presenta una gráfica que relaciona el porcentaje de variación en el espesor de losa obtenido con respecto a la variación en el k-value.

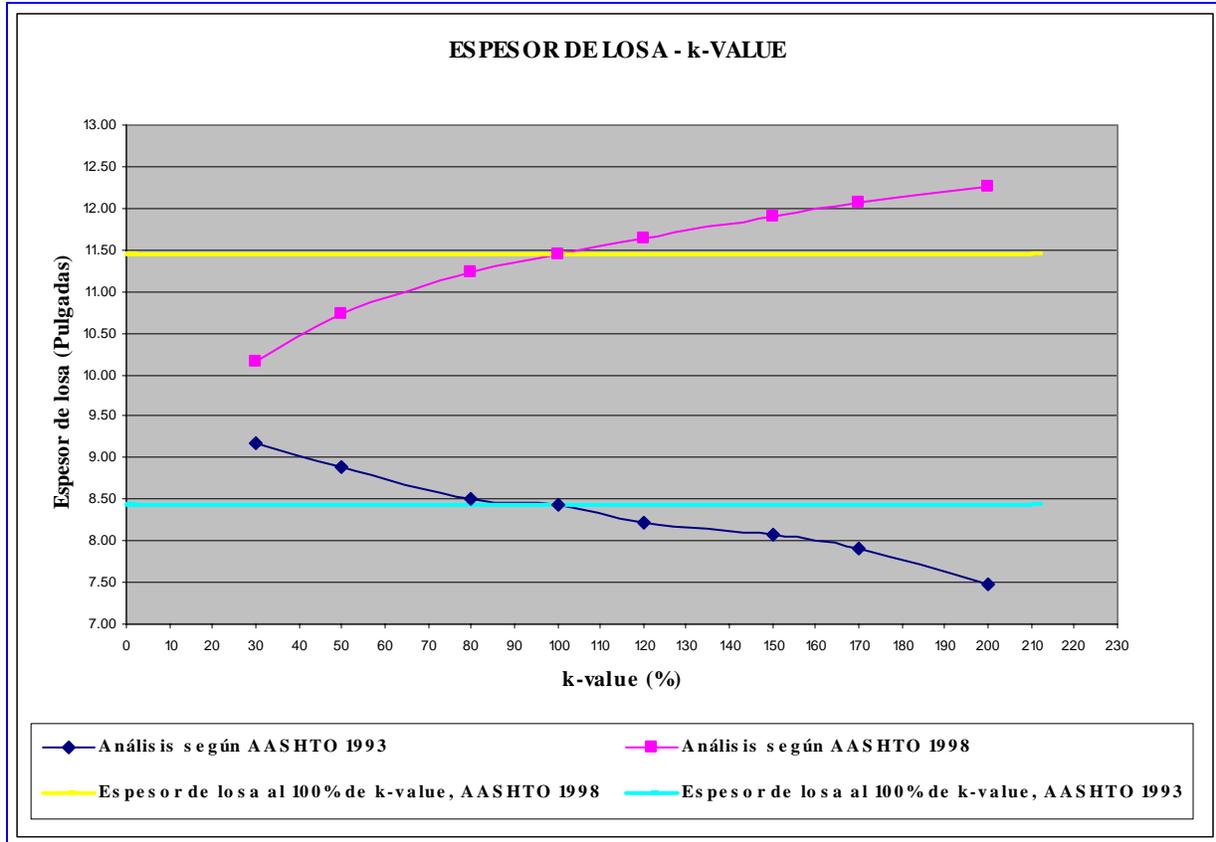


Figura No.17: Gráfica que relaciona los espesores de losa obtenidos con las metodologías AASHTO 1993 y AASHTO 1998 a partir de la variación en el k-value.

En la figura No.19 se observa que para valores de k-value menores al 100%, existe una mayor variación en el espesor de la losa obtenido con la metodología AASHTO-1998 con respecto a la variación en el espesor de losa obtenido según AASHTO-1993. Este comportamiento cambia para valores de k-value mayores al 100%, en cuyo caso se obtienen mayores variaciones en el espesor de losa con los resultados obtenidos con base en la metodología AASHTO-1993.

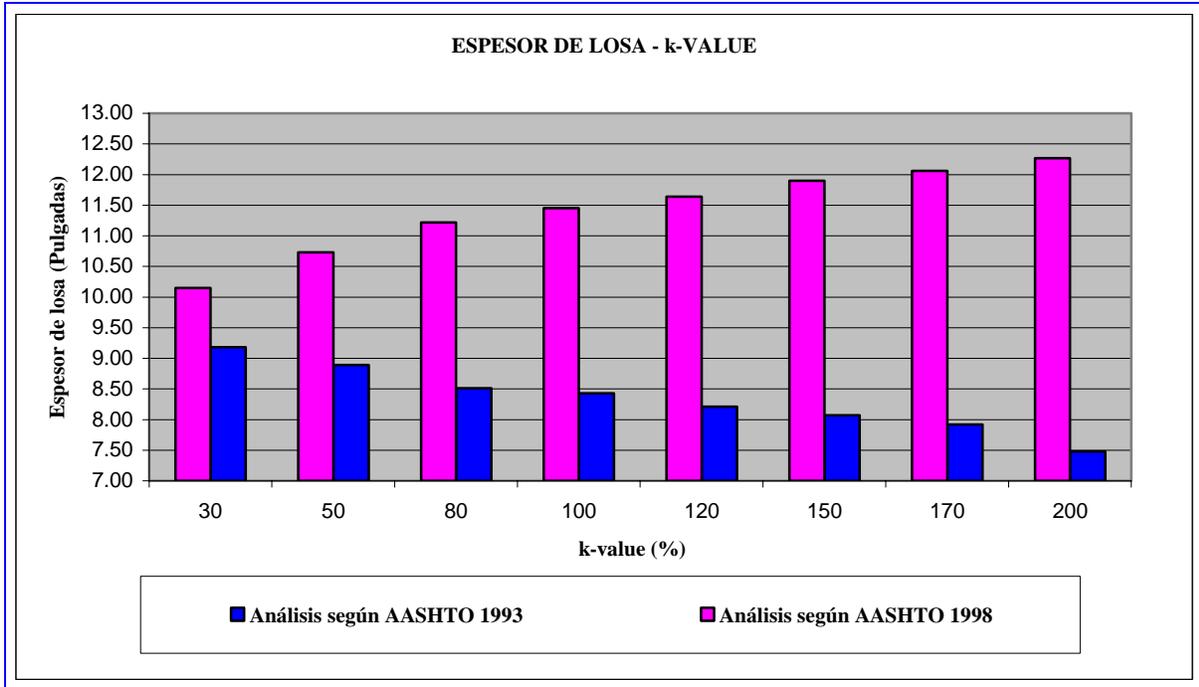


Figura No.18: Gráfica que presenta una comparación entre los espesores de losa obtenidos con las metodologías AASHTO 1993 y AASHTO 1998 a partir de la variación en el k-value.

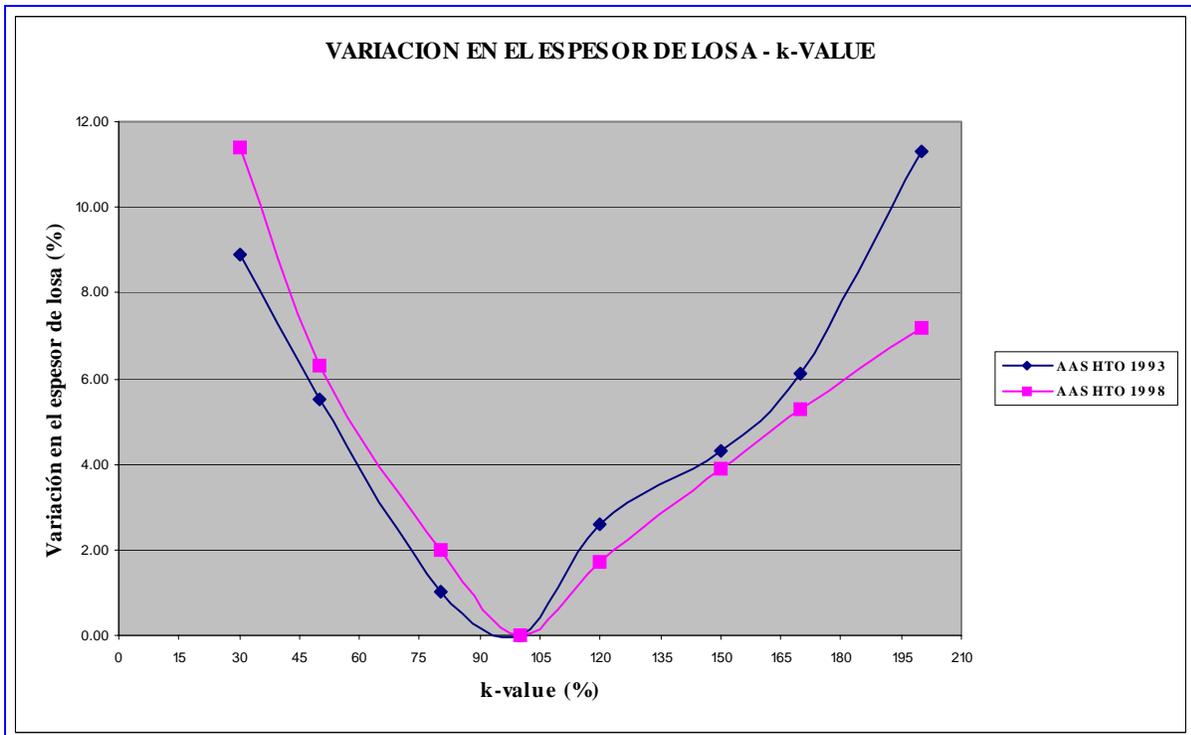


Figura No.19: Gráfica que relaciona el porcentaje de variación en el espesor de losa con respecto a la variación en el k-value.

8.0 Conclusiones.

Con base en la investigación bibliográfica realizada para el desarrollo del presente trabajo, en los resultados obtenidos al modelar estructuras de pavimentos con los programas de computadora PAS y RPD y en el análisis e interpretación de los mismos, se concluye lo siguiente:

- Importantes cambios en el k-value efectivo, para la estructura de pavimento tipo empleada en este estudio, tienen poca incidencia en el espesor de la losa de concreto utilizando ambas metodologías de diseño. Al efectuar una comparación entre el espesor de losa correspondiente al 100% del k-value efectivo con el espesor de losa obtenido realizando una reducción del 50% en el valor de k-value efectivo, se obtiene un incremento en el espesor de losa del 5.5% utilizando AASHTO-1993 (0.46 pulgadas (\pm 1.17 cm)) y una reducción del 6.3% (0.72 pulgadas (\pm 1.83 cm)) utilizando AASHTO-1998.
- De acuerdo con el método de diseño AASHTO-1993, la caracterización de la subrasante debe realizarse a partir del módulo de resiliencia (M_R). Para el diseño de pavimentos rígidos, el M_R no es el valor que se utiliza directamente como parámetro de entrada, ya que en su lugar se utiliza el módulo de reacción combinado, el cual es obtenido a partir del M_R y de las características de la subbase (D_{SB} , E_{SB}). En el caso cuando la estructura del pavimento no considera una capa de subbase y la losa de concreto será apoyada directamente sobre la subrasante, el módulo de reacción combinado se obtiene únicamente a partir del M_R (ver sección 5.0 de este documento).
- De acuerdo con lo establecido por AASHTO-1998, la caracterización de la subrasante se lleva a cabo a través del módulo de reacción de la subrasante (k-value), el cual puede ser obtenido a partir de ensayos de deflexión y retrocálculo (método recomendado), ensayos de placa de carga o a través de correlaciones con el tipo de suelo. Al respecto se considera que con los métodos de deflexión y retrocálculo o ensayos de placa de carga probablemente se obtienen valores de k-value precisos de la capacidad de la subrasante; sin embargo se considera que debido a la relativa poca incidencia que tiene el k-value en el dimensionamiento del espesor de losa, el k-value puede ser obtenido con un razonable nivel de confianza, a partir de correlaciones basadas en el tipo de suelo y/o ensayos de laboratorio, efectuando los ajustes pertinentes que establece la metodología.
- Del análisis comparativo entre los resultados obtenidos con ambas metodologías de diseño, se observa que se obtienen mayores espesores de losa (en el orden del 36%) al utilizar la metodología de diseño AASHTO-1998. Cabe mencionar que la metodología AASHTO-1998, es un método de diseño alternativo para la selección de espesores de losa y espaciamientos de juntas transversales con el propósito de controlar el desarrollo de grietas transversales por el efecto del clima, materiales de base y subrasante. Este modelo de diseño incluye recomendaciones obtenidas del proyecto NCHRP 1-30 el cual utilizó información disponible en la base de datos LTPP, por lo cual se considera más confiable.
- De acuerdo al método con el cual se diseña la estructura del pavimento, se debe planificar la campaña geotécnica para caracterizar la subrasante, lo anterior con el propósito de conocer el grado de homogeneidad de ésta. Cabe indicar que para ambas metodologías de diseño, la

exploración del subsuelo deberá comprender profundidades superiores a 3 m a partir del nivel de subrasante proyectada. Para el caso de la metodología AASHTO-1998, dependiendo del método utilizado para la determinación del k-value, ajustes deberán ser aplicados en el caso de existir presencia de un relleno y/o una capa rígida poco profunda. Para efectos prácticos puede considerarse efectuar ajustes por la presencia de un estrato rígido, en el caso de existir un material que posea una rigidez relativa igual o mayor a 10 veces la rigidez del estrato adyacente.

- Dado que existen diferencias entre las consideraciones de diseño establecidas en las metodologías de diseño AASHTO-1993 y AASHTO-1998, se considera adecuado que en los diseños de estructuras de pavimentos rígidos, se indique la edición de la metodología AASHTO con la cual se llevará a cabo el diseño.

9.0 Referencias.

- [1] “GUIDANCE NOTES ON BACKCALCULATION OF LAYER MODULI AND ESTIMATION OF RESIDUAL LIFE USING FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER TEST DATA”, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Highways Department, Research & Development Division, Octubre de 2000.
- [2] “ASTM D 653-02, Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids”, American Society for Testing and Materials.
- “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993”, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- “AASHTO Supplement to the Guide for Design of Pavement Structures 1998”, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- “USO DEL DEFLECTOMETRO DE IMPACTO PARA EVALUACION ESTRUCTURAL DE RECAPADOS ASFALTICOS SOBRE PAVIMENTOS DE HORMIGON”, Gauss, S.A.-Chile, Rodrigo Gaete P., Claudio Fuentes L., Sergio Valverde P.

Pagina de Internet:

http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/04_design_parameters/04-2_body.htm

[Pagina Principal](#)

E-mail: uidv.contacto@mop.gob.sv