



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**APLICACIÓN DE LA NORMA AASHTO 2002
EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**

Jorge Tomas von Quednow Gálvez
Asesorado por Ing. Jorge René von Quednow Cruz

Guatemala, Agosto de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II:	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III:	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV:	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V:	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO:	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR:	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
EXAMINADOR:	Ing. Juan Merck Cos
EXAMINADOR:	Ing. Christa Classon de Pinto
SECRETARIO:	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**APLICACIÓN DE LA NORMA AASHTO 2002
EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 27 de noviembre de 2002.

Jorge Tomas von Quednow Gálvez.

AGRADECIMIENTOS A

- Dios** Esa fuerza universal que actúa en cada hombre, Por estar conmigo y ser la luz en mi camino, por darme a entender como levantarme de mis tropiezos, y darle sentido a mi vida , en definitiva el haber puesto en mis manos estos gratuitos dones.
- Mi familia** Por sus esfuerzos en apoyarme.
- Mi asesor** Por brindarme su asesoría, en este apasionante mundo del diseño vial.
- Los ingenieros** Roberto Edmundo Quiñones y Raúl Estuardo Alvarado Cuevas López, por su motivación y entusiasmo transmitidos, que fueron imprescindibles para llevar a cabo la construcción de estos nuevos horizontes.

ACTO QUE DEDICO A

MIS PADRES Jorge Rene von Quednow, por darme su amistad, cariño, apoyo, comprensión y sobre todo por marcarme el rumbo que definió mi caminar en la vida. Elena del Rosario de von Quednow Gálvez, por su aliento, y apoyo incondicional, por infundir en mi la disciplina y la ética que me llevaron a culminar esta etapa de mi vida.

MIS HERMANOS Maria Alejandra y Diego Sebastián por brindarme su apoyo y entusiasmo que hizo mas ligero el poder desarrollar mis estudios universitarios.

MIS TÍOS Siempre tuvieron un espacio y tiempo para dejar a un lado sus prioridades y permitirme compartir con ellos su cariño.

MIS AMIGOS Con los que formamos una valiosa amistad, por todas aquellas horas de trabajo que compartimos, por todas las alegrías y penas que tuvimos que aprender a vivir juntos y que gracias a esto se convirtieron en un apoyo fundamental.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTADO DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XIV
RESUMEN.....	XIV
OBJETIVOS.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	XVIII

1. EL PAVIMENTO

1.1 Qué es un pavimento	1
1.1.1 Pavimentos y clasificación.....	1
1.1.1.1 Pavimentos flexibles.....	1
1.1.1.2 Pavimentos rígidos.....	2
1.2 Terminología, función y características de las diferentes capas estructurales de un pavimento flexible.....	2
1.2.1 Terreno de fundación.....	2
1.2.2 Sub-base.....	3
1.2.3 Base.....	4
1.2.4 Capa de rodamiento.....	5
1.3 Materiales bituminosos.....	6
1.3.1 Definiciones de materiales bituminosos.....	6
1.3.2 Tipos de asfaltos y alquitranes en pavimentos.....	7
1.3.3 Granulometría del material pétreo empleado en mezclas asfálticas.....	8

2. CARACTERÍSTICAS DEL TRÁNSITO

2.1	Introducción.....	11
2.2	Conversión de tránsito en ESAL's.....	11
2.2.1	Factores equivalentes de carga.....	12
2.2.2	Factor camión.....	14
2.2.3	Procedimiento simplificado.....	15
2.2.4	Procedimiento de cálculo riguroso.....	17
2.2.5	Factores equivalentes de carga para ahuellamiento....	19
2.3	Análisis de tránsito.....	23
2.3.1	Volúmenes de tránsito.....	23
2.3.2	Volúmenes de camiones.....	23
2.3.3	Peso de camiones.....	24
2.3.3.1	Estaciones permanentes de control de cargas.....	24
2.3.3.2	Estaciones portátiles.....	25
2.3.3.3	Pesaje en movimiento.....	25
2.3.3.4	Componentes de un programa de monitoreo de tránsito.....	27
2.3.3.5	Factor de distribución por dirección.....	28
2.3.3.6	Factores que afectan la exactitud del cálculo de los ESAL's	28

3. CONCEPTOS DE CONFIABILIDAD

3.1	Conceptos básicos de variabilidad.....	31
3.1.1	Valor medio, rango, desvío estándar y coeficiente de variación.....	31
3.1.2	Muestra versus variación.....	33
3.1.3	Distribución de variación.....	33
3.2	Ejemplos de variabilidad.....	39
3.2.1	Variabilidad en el diseño.....	39

3.2.2	Variabilidad en la construcción.....	40
3.2.3	Variabilidad en el comportamiento.....	44
3.2.4	Cómo la variabilidad afecta la bondad de diseño.....	44
3.3	Concepto general de confiabilidad de diseño.....	45
3.3.1	Uso del concepto de confiabilidad.....	45
3.3.2	Definiciones de confiabilidad.....	46
3.3.3	Aplicación de la confiabilidad al diseño.....	52
3.3.4	Selección del nivel de confiabilidad.....	54

4. DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

4.1	Antecedentes.....	57
4.2	Variables de entrada.....	59
4.2.1	Variables de tiempo.....	59
4.2.2	Tránsito.....	60
4.2.3	Confiabilidad.....	60
4.2.4	Subrasantes expansivas o sometidas a expansión por congelación.....	61
4.2.5	Criterio de adopción de niveles de serviciabilidad.....	61
4.2.6	Propiedades de los materiales.....	62
4.2.7	Drenaje.....	62
4.3	Determinación de espesores.....	62
4.3.1	Estabilidad y factibilidad de construcción.....	65
4.3.2	Espesores mínimos en función del número estructural.....	66
4.3.3	Consideraciones de costo en la selección de espesores de capas.....	69
4.4	Consideraciones de pérdida de serviciabilidad por Condiciones ambientales.....	70
4.5	Análisis de sensibilidad	74
4.6	Limitaciones en el método de diseño AASHTO.....	75

4.7 Tendencias futuras el diseño de pavimentos flexibles.....76

5. DISEÑO ASISTIDO POR UN ORDENADOR

5.1 Diseño asistido por un ordenador, aplicando la norma
AASHTO 2002 en el proyecto autopista Los Altos, ubicada
en el tramo Quetzaltenango, Salcajá.....77

CONCLUSIONES.....89

RECOMENDACIONES.....90

BIBLIOGRAFÍA.....91

ANEXOS.....92

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔPSI	Pérdida de serviciabilidad
ESAL	Equivalent Simple Axial Load o ESAL (ejes equivalentes de 80 kN o 18 kips ²)
LEF	Por sus siglas en inglés Load Equivalent Factor o factor equivalente de carga
M_R	Módulo resiliente de la sobrasarte (en psi)
R	Resistencia de Hveem
S_0	Desvío estándar de todas las variables
SN	Número estructural (pulg.)
W_{18}	Número de cargas de 18 kips (80 kN) previstas
Z_R	Abscisa correspondiente a un área igual a la confiabilidad R en la curva de distribución normalizada
IRI	International Roughness Index o Índice Internacional de Rugosidad

KIP

1,000 Kgs o 10KN

W_{18}

Número de cargas de ejes simples equivalentes de dieciocho kips (80 Kn) calculadas conforme el transito vehicular.

GLOSARIO

AASHTO

Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte o, por sus siglas en inglés, *American Association of State Highway and Transportation Officials*.

ADT

Tránsito diario inicial promedio o, por sus siglas en inglés, *Average Daily Traffic*.

Ahuellamiento

Depresión longitudinal de la superficie en correspondencia con la zona transitada por los neumáticos.

Capacidad Estructural

Capacidad del pavimento para brindar un uso confortable y seguro a los usuarios.

ESAL's

Ejes equivalentes de carga o, por sus siglas en inglés, *Equivalent Axial Load*.

Fisuras transversales

Fisuras que no son provocadas por flexión sino por contracción del concreto asfáltico debido a bajas temperaturas o al endurecimiento del asfalto. En general no están asociadas con cargas.

Fricción superficial	Fuerza desarrollada en la interfase rueda-pavimento que resista el deslizamiento cuando se aplican las fuerzas de frenado.
a_i	Coefficientes estructurales o de capa (adimensionales)
GF	Factor de crecimiento o, por sus siglas en inglés <i>Growth Factor</i> .
Hombro/berma	Áreas de la carretera, contiguas y paralelas a la carpeta o superficie de rodadura, que sirven de confinamiento a la capa de base y de zona de estacionamiento accidental de vehículos.
IRI	Índice de rugosidad internacional o, por sus siglas en inglés, <i>International Roughness Index</i> (en pulg/milla.)
LEF	Factores equivalentes de carga. Por sus siglas en el idioma inglés, <i>Load Equivalente Factor</i> .
Mr	Módulo resiliente efectivo o, por sus siglas en inglés, <i>Resilient Module</i> .

R	Confiabilidad o, por sus siglas en inglés, Reliability.
Serviciabilidad / rugosidad	Capacidad del pavimento para brindar un uso confortable y seguro a los usuarios.
SN	Número estructural o, por sus siglas en inglés <i>number structural</i> .
SQ	Desviación estándar ó, por sus siglas en inglés, <i>stándar Swerve Equivalent</i>
TF	Factor de camión o por sus siglas en inglés, <i>Truck factor</i> .
TKS	Porcentaje de camiones pesados o, por sus siglas en inglés, <i>trucks</i> .
TODA	Tránsito promedio diario.
Uf	Daño relativo.
WIM	Método de pesado en movimiento o, por sus siglas en inglés, <i>Weight in Motion</i> .

RESUMEN

Este trabajo de graduación está escrito primordialmente para ofrecer los más innovadores e importantes adelantos en la tecnología estructural de caminos, ya que la ingeniería vial es una materia árida para el estudiante. Los conocimientos actuales, casi en todas las fases de la ingeniería vial, son rápidamente ampliados por el intenso trabajo de investigación y estudio que se realiza. Como resultado de lo anterior, muchas prácticas comúnmente aceptadas están modificándose o han sido puestas en duda muy seriamente, por lo que el material que se incluye consiste en la aplicación de la norma AASHTO 2002 en el diseño de pavimentos flexibles para nuestra región.

Esta nueva guía de diseño emplea datos que incluyen el tráfico y los materiales usados (asfalto, concreto y suelos), el clima de la localidad respectiva, el grafo de confianza del diseñador, entre otras.

Entre los resultados que esta nueva metodología provee al ingeniero están las predicciones de comportamiento del pavimento, que incluyen la presencia de deformaciones permanentes, fisuras o agrietamientos por fatiga y por cambios en temperatura; y el grado de daños superficiales en el pavimento descrito por *el International Roughness Index (IRI)*. Todos estos resultados son obtenidos con diversos modelos y ecuaciones que forman el **Estado del Arte** en el área de pavimentos, los cuales tienen una base mecánica-empírica. Mecánica

porque se basa en las leyes y propiedades físicas de los diversos materiales, y empíricas porque necesitan datos medidos en el campo para calibrar las ecuaciones y modelos físicos-mecánicos usados.

En general, Centroamérica se ha desarrollado a raíz de mejorar su posición económica **intraregional** e internacional, lo cual ha sido posible por la ampliación de sus comunicaciones hacia puestos fronterizos y zonas de comercio en los distintos puertos de ambos océanos.

Estos corredores principales tienen la característica esencial de haberse desarrollado para unir las principales zonas económicas de cada país, como eslabón de la ruta internacional interamericana. La magnitud de estos costos justifica la búsqueda del mejor método de diseño para optimizar el uso de los fondos destinados a las carreteras y caminos y es en donde la Facultad de Ingeniería tiene la responsabilidad de formar ingenieros que provean diseños óptimos acordes a las necesidades y condiciones actuales de la industria nacional e internacional.

OBJETIVOS

A. General

1. Prestar a la comunidad universitaria la aplicación de esta nueva guía de diseño, la metodología que incluye y las diferencias básicas con la actual guía de diseño del AASHTO 2002.
2. Proporcionar los 14 nuevos conceptos de las principales variables que intervienen en el proceso de diseño de pavimentos flexibles, así como el método iterativo que relaciona las diferentes jerarquías con el nivel de confianza requerida por el ingeniero o el tipo de camino a ser diseñado.
3. Presentar en forma clara y precisa un panorama específico de los procedimientos de aplicación del método AASHTO 2002 de diseño de pavimentos flexibles y su aplicación con las diferentes variables sociales y políticas que intervienen.

B. Especificos

1. Permitir al lector la identificación de las variables relevantes en un proceso de diseño y su aplicabilidad a un problema en particular.

2. Conocer el uso de la más reciente versión del manual para diseño de pavimentos flexibles norma AASHTO 2002.
3. Proporcionar las herramientas teóricas que faciliten el uso de otros manuales o programas de diseño.

4. Presentar los conocimientos básicos, la terminología, función y características de las diferentes capas estructurales de un pavimento flexible.
5. Proporcionar criterios para evaluar con espíritu crítico los resultados de un diseño y determinar su aplicabilidad a casos concretos.

INTRODUCCIÓN

Hoy nuestro país está formándose un camino a través de un nuevo orden económico mundial, que requiere del aumento de las exportaciones, de todo un esfuerzo público que deberá volcarse a modernizar y dinamizar el comercio con otras naciones. La

conquista de estos mercados externos exige una nueva mentalidad. Es indispensable asegurar las inversiones en infraestructura vial para obtener un sistema de organización social orientado hacia la productividad, y así dar los primeros incentivos para promover la competitividad.

Poco se podría decir en sentido contrario para rebatir la afirmación que uno de los retos que se nos plantea como egresados de la Facultad de Ingeniería es lograr un diseño óptimo de las diferentes etapas estructurales de un pavimento flexible. Un ejemplo evidente y urgente es el déficit en el sector vial, donde el mayor desafío es llevar a cabo las estrategias que nos lleven a obtener una mayor vida útil en nuestro sistema de vías de comunicación. Para esto es necesario reevaluar condiciones como el costo político y la falta de actualización en lo que respecta a métodos de diseño.

Solo así se podrá brindar una infraestructura vial óptima que permita el libre acceso de la producción de nuestro país a un mercado global. Esto claramente creará condiciones para mejorar e incrementar las exportaciones, atraer nuevas inversiones y generar mejores oportunidades de empleo, lo que se traducirá mayor crecimiento económico para retomar el rumbo del crecimiento sostenible.

1. PAVIMENTO

1.1 Definición

Un pavimento es una estructura vial que tiene como fin principal ofrecer una superficie de tráfico vehicular, que sea limpia, cómoda, segura y durable.

Estas estructuras viales pueden construirse directa y continuamente apoyadas sobre el suelo (vías normales en cortes y rellenos), o pueden estar fuera del contacto directo con el terreno (puentes, pasos elevados, pasos a desnivel, viaductos, etc.).

El funcionamiento de los pavimentos apoyados continuamente sobre el suelo está estrechamente ligado a las propiedades del mismo, por lo tanto el diseño de estos pavimentos está íntimamente ligado a los principios y procedimientos de la mecánica de suelos.

1.1.1 Pavimentos y clasificación

Dividiremos los pavimentos en dos clases: flexibles y rígidos. Esta división, si bien es un tanto arbitraria, la hemos adoptado por ser la más conocida y generalizada.

1.1.1.1 Pavimentos flexibles

Son aquellos que tienen una base flexible o semirrígida, sobre la cual se ha construido una capa de rodamiento formada por una mezcla bituminosa de alquitrán o asfalto.

1.1.1.2 Pavimentos rígidos

Son aquellos en los cuales la capa de rodamiento está formada por concreto de cemento Pórtland, con o sin armadura metálica. En algunos casos estos pavimentos podrán llevar una carpeta de desgaste formada por una mezcla bituminosa.

Además de los pavimentos anteriormente mencionados, existe un gran número de pavimentos de tipo especial, tales como aquellos formados por adoquines, ladrillos, bloques de madera, etcétera, los que son empleados, algunas veces, en calles y plazas.

1.2 Terminología, función y características de las diferentes capas de estructurales de un pavimento flexible

En la actualidad no existe una terminología única para la designación de las diferentes partes que constituyen un pavimento. Así, por ejemplo, algunos llaman pavimentos a la capa superficial de mezcla bituminosa o de concreto; otros designan esta capa con el nombre de firme o afirmado, y muchos llaman pavimento al conjunto de todas las capas.

1.2.1 Terreno de fundación

De su capacidad de soporte depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea éste flexible o rígido. Si el terreno de fundación es pésimo, por ejemplo, o si el material que lo compone tiene un alto contenido de materia orgánica, debe desecharse este material y sustituirse por otro de mejor calidad. Si el terreno de fundación es malo y se halla formado por un suelo fino, limoso o arcilloso, susceptible de saturación, habrá de colocarse una sub-base granular de material seleccionado antes de poner la base y capa de rodamiento.

Si el terreno de fundación es regular o bueno y está formado por un suelo bien graduado que no ofrece peligro de saturación, o por un material de granulometría gruesa, posiblemente no se requerirá la capa de sub-base.

Finalmente, si el terreno de fundación es excelente, es decir, que tiene un valor soporte elevado y no existe, además, la posibilidad de que se sature de agua, bastaría colocar encima la capa de rodamiento.

Dado lo expuesto anteriormente, tendremos que:

- a) Si el terreno de fundación es pésimo, debe desecharse el material que lo compone, siempre que sea posible, y sustituirlo por un suelo de mejor calidad.
- b) Si el terreno de fundación es malo, habrá que colocar una sub-base de material seleccionado antes de poner la base.
- c) Si el terreno de fundación es regular o bueno, podría prescindirse de la sub-base.
- d) Si es excelente, podría prescindirse de la sub-base y la base.

1.2.2 Sub-base

Es la capa de material seleccionado que se coloca encima de la subrasante. Tiene por objeto:

- a) Servir de capa de drenaje al pavimento.
- b) Controlar, o eliminar en lo posible, los cambios de volumen, elasticidad y plasticidad perjudiciales que pudiera tener el material de la subrasante.

- c) Controlar la ascensión capilar del agua proveniente de las capas freáticas cercanas, o de otras fuentes, protegiendo así el pavimento contra los hinchamientos que se producen en épocas de helada. Este hinchamiento es causado por el congelamiento del agua capilar, fenómeno que se observa especialmente en suelos limosos donde la ascensión capilar del agua es grande.

El material de la sub-base debe ser seleccionado y tener mayor capacidad soporte que el terreno de fundación compactado. Este material puede ser arena grava, granzón escoria de los altos hornos, o residuos del material de cantera.

En algunos casos es posible emplear para sub-base el material de la subrasante mezclado cemento, etcétera.

El material ha de tener las características de un suelo A1 o A2. Aproximadamente, su límite líquido debe ser inferior a 35 % y su índice plástico, no mayor de 6%. El CBR no podrá bajar de 15 %.

Si la función principal de la sub-base es servir de capa de drenaje, el material a emplearse debe ser granular, y la cantidad de material fino (limo y arcilla) que pase al tamiz número 200 no ha de ser mayor del 8 %.

1.2.3 Base

Esta capa tiene por finalidad absorber los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos y, además, repartir uniformemente estos esfuerzos a la sub-base y al terreno de fundación.

Las bases pueden ser granulares, o bien estar formadas por mezclas bituminosas o mezclas estabilizadas con cemento u otro material ligante.

El material pétreo que se emplee en la base deberá llenar los siguientes requisitos:

- a) Ser resistente a los cambios de humedad y temperatura.
- b) No presentar cambios de volumen que sean perjudiciales.
- c) El porcentaje de desgaste, según el ensayo "Los Ángeles", debe ser inferior a 50.
- d) La fracción del material que pase el tamiz No. 40, ha de tener un límite líquido menor del 25 %, y un índice de plasticidad inferior a 6.
- e) La fracción que pasa el tamiz No. 200, no podrá exceder de 1/2, y en ningún caso de los 2/3 de la fracción que pase el tamiz No. 40.
- f) La graduación del material de la base, es menester que se halle dentro de los límites indicados en la figura 28.
- g) El CBR tiene que ser superior a 50 %.

Por lo general, para la capa de base se emplea piedra triturada, grava o mezclas estabilizadas de suelo cemento, suelo bituminoso, etcétera.

1.2.4 Capa de rodamiento

Su función primordial será proteger la base impermeabilizando la superficie, para evitar así posibles infiltraciones del agua de lluvia que podrían saturar parcial o totalmente las capas inferiores. Además, evita que se desgaste o se desintegre la base a causa del tránsito de los vehículos.

Asimismo, la capa de rodamiento contribuye, en cierto modo, a aumentar la capacidad soporte del pavimento, especialmente si su espesor es apreciable (mayor de 3").

1.3 Materiales bituminosos

1.3.1 Definiciones

Asfalto de petróleo: obtenido directamente por refinación del petróleo de base asfáltica. Es un material ligante sólido o semisólido, de color negro o marrón, que se licua gradualmente al calentarlo. Sus constituyentes principales son betunes.

Betunes: son mezclas de hidrocarburos naturales o pirogenados, o combinación de ambos, que pueden ser gaseosos, líquidos, semisólidos o sólidos. Son completamente solubles en bisulfuro de carbono.

Cemento asfáltico (AC): es asfalto refinado, o una combinación de asfalto y aceite fluidificante, de consistencia apropiada para trabajos de pavimentación.

Aceite fluidificante: es un aceite viscoso, espeso, no volátil, obtenido por la destilación de productos volátiles livianos que se encuentran en el petróleo crudo. Se usa para ablandar los asfaltos muy duros, cuya penetración es menor de 10, hasta obtener la consistencia deseada.

Asfalto líquido: es un cemento asfáltico licuado mediante la adición de un fluidificante (destilado de petróleo ligero y volátil). Cuando se halla expuesto a la intemperie, se evapora el destilado volátil y queda únicamente el cemento asfáltico. Hay tres tipos: de cura rápida, mediana y lenta.

Asfalto líquido de rápido curado (RC - *Cut-Backs*): es un cemento asfáltico fluidificado con nafta, o con un destilado del tipo de la gasolina.

Asfalto líquido de medio curado (MC - *Cut-Backs*): es un cemento asfáltico fluidificado con kerosén.

Asfalto líquido de cura lenta (SC - *Road Oil*): es un aceite asfáltico residual o una mezcla de estos aceites con destilados de volatilización lenta.

Asfalto emulsionado: es una emulsión de cemento asfáltico y agua, conteniendo una pequeña cantidad de agente emulsivo.

Alquitrán: es un material bituminoso, viscoso o fluido, obtenido por destilación destructiva de materias orgánicas como carbón, lignito, madera y material vegetal. La palabra **alquitrán** debe ir siempre acompañada del nombre de la materia de la cual es extraído.

1.3.2 Tipos de asfaltos y alquitranes en pavimentos

Los asfaltos y alquitranes comúnmente empleados en la pavimentación de carreteras, calles o aeropistas, son los siguientes:

Cementos asfálticos (AC), con los siguientes grados de penetración:

60-70,85-100; 120-150 y 200-300.

Asfaltos líquidos de rápido curado (RC) de los grados RC-0, RC-1, RC-2, RC-3, RC-4 y RC-5. A mayor número corresponde mayor porcentaje de cemento asfáltico.

Asfaltos líquidos de medio curado (MC - *Cut-backs*): MC-0, MC-1, MC-2, MC-3, MC-4 y MC-5. A mayor número corresponde mayor porcentaje de cemento asfáltico.

Asfaltos líquidos de cura lenta (*SC-Road oils*): SC-0, SC-1, SC-2, SC-3, SC-4 y SC-5. A mayor número corresponde mayor porcentaje de cemento asfáltico.

Asfaltos emulsionados:

- de asentamiento rápido: RS-1 y RS-2;
- de asentamiento medio: MS-1;
- de asentamiento lento: SS-1,
- alquitranes: RT-1 a RT-12.

1.3.3 Granulometría del material pétreo empleado en mezclas asfálticas

En la Figura 1 se indican los ocho tipos de mezclas asfálticas en caliente, Dos recientemente por el instituto de Asfalto de los EE.UU. El tamaño máximo del agregado a emplearse varía desde $\frac{1}{2}$ " para el tipo Macadam hasta el No. 4 para láminas asfálticas. Asimismo, en la Figura 30 se indica la proporción de

agregados grueso, fino y polvo mineral, recomendable para estas mezclas en caliente.

El contenido de polvo mineral indicado en las zonas crítica e intermedia de la Figura 1, deberá emplearse en la siguiente manera:

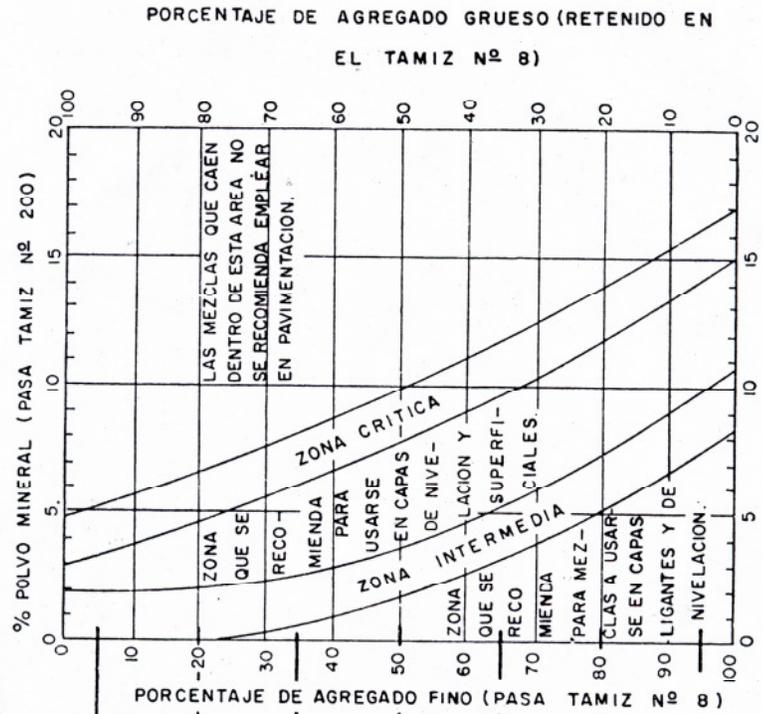
a) Zona crítica: el contenido de polvo mineral indicado en esta zona debe emplearse solo cuando se tiene amplia experiencia con este tipo de mezclas y además, cuando se hayan realizado los correspondientes ensayos de laboratorio.

b) Zona intermedia: el contenido de polvo mineral indicado en esta zona puede emplearse en mezclas destinadas a capas de rodamiento y de nivelación, así como en capas ligantes y de base.

Figura 1. Proporción de agregados para muestras asfálticas

PROPORCION DE AGREGADOS PARA MUESTRAS ASFALTICAS

TIPO DE MEZCLA ASFALTICA.		TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO
TIPO	DESCRIPCION	CAPAS DE ROÍ CAPA DE BASE DAMIENTO Y DE LIGANTE Y DE NIVELACION
I	MACADAM	2" $\frac{1}{2}$
II	GRADUACION ABIERTA	$\frac{3"}{8}$ - $\frac{3"}{4}$
III	GRADUACION GRUESA	$\frac{1"}{2}$ - $\frac{3"}{4}$
IV	GRADUACION DENSA	$\frac{1"}{2}$ - 1" - $\frac{1"}{2}$
V	GRADUACION FINA	$\frac{1"}{2}$ - $\frac{3"}{4}$
VI	LAMINA DE PIEDRA	$\frac{1"}{2}$ - $\frac{3"}{4}$
VII	LAMINA DE ARENA	$\frac{3"}{8}$
VIII	LAMINA FINA	Nº 4



AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 1993.

2. CARACTERÍSTICAS DE TRÁNSITO

2.1 Introducción

En el método AASHTO los pavimentos se proyectan para que resistan determinado número de cargas durante su vida útil. El tránsito está compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes, y a los efectos de cálculo, se los transforma en un número equivalente de ejes tipo de 80 kN o 18 kips. De aquí en adelante se los denominará *Equivalent Simple Axial Load* o ESAL.

La transformación del número equivalente de ejes de distinta naturaleza y peso en ESALs es una tarea compleja. Es necesario fijar bien el concepto de que el tipo de eje y su peso es más importante que el peso del vehículo en lo que respecta al comportamiento del pavimento.

2.2 Conversión de tránsito en ESALs

Las diferentes cargas actuantes sobre un pavimento producen diferentes tensiones y deformaciones en el mismo. Además, diferentes espesores de pavimentos y de materiales responden de diferente manera a una misma carga. Como las diferentes cargas producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, las fallas serán distintas. Para tener en cuenta esta diferencia, el tránsito es reducido a un número equivalente de ejes de una determinada carga que producirá el mismo daño que toda la composición del tránsito. Esta carga tipo según AASHO es de 80 kN o 18 kips.

La conversión se hace a través de los factores equivalentes de carga LEF (*Load Equivalent Factor*).

2.2.1 Factores equivalentes de carga

El concepto de convertir un tránsito mixto en un número de ESALs de 80 kN fue desarrollado en *el Road Test* de la AASHTO. En este ensayo se cargaron pavimentos similares con diferentes configuraciones de ejes y cargas para analizar el daño producido.

Así, el factor equivalente de carga o LEF es un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por una carga dada de un tipo de eje y la producida por el eje estándar de 80 kN en el mismo eje.

$$\text{LEF} = \frac{\text{No de ESALs de 80Kn. que producen una pérdida de serviciabilidad}}{\text{No de ejes de x Kn que producen la misma pérdida de serviciabilidad}}$$

Por ejemplo, para producir una pérdida de serviciabilidad de 4.2 a 2.5 son equivalentes:

100,000 ejes simples de 80 kN

14,347 ejes simples de 133 kN

$$\text{LEF} = 100,000/14,347=6.97$$

Tabla I. Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem, Pt = 2, 0

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.009	0.012	0.011	0.010	0.009	0.009
8	0.03	0.035	0.036	0.033	0.031	0.029
10	0.075	0.085	0.090	0.085	0.079	0.076
12	0.165	0.177	0.189	0.183	0.174	0.168
14	0.325	0.338	0.354	0.350	0.338	0.331
16	0.589	0.598	0.613	0.612	0.603	0.596
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.59
22	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
24	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
26	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
28	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
30	10.4	10.0	9.2	8.6	8.7	9.2
32	14.0	13.5	12.4	11.5	11.5	12.1
34	18.5	17.9	16.3	15.0	14.9	15.6
36	24.2	23.3	21.2	19.3	19.0	19.9
38	31.1	29.9	27.1	24.6	24.0	24.1
40	39.6	38.0	34.3	30.9	30.0	31.2
42	49.7	47.7	43.0	38.6	37.2	38.5
44	61.8	59.3	53.4	47.6	45.7	47.1
46	76.1	73.0	65.6	58.3	55.7	57.0
48	92.9	89.1	80.0	70.9	67.3	68.6
50	113.00	108.00	97.00	86.00	81.00	82.00

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

Dado que cada tipo de pavimento responde de manera diferente a una carga, los LEFs cambian de acuerdo al tipo de pavimento. Por ejemplo, si el punto de falla de un pavimento cambia, también lo hace el LEF. Es así que pavimentos rígidos y flexibles tienen diferentes LEFs. También cambia según el SN (pavimentos flexibles), según el espesor de losa (pavimentos rígidos) y el nivel de serviciabilidad adoptado.

En anexos se muestran tablas donde se indican LEFs para distintos tipos de ejes, de pavimentos y serviciabilidades finales.

2.2.2 Factor de camión

El LEF da una manera de expresar los niveles equivalentes de daño entre ejes, pero también es conveniente expresar el daño en términos del deterioro producido por un vehículo en particular. Los daños producidos por cada eje de un vehículo son sumados para dar el daño producido por ese vehículo. Así nace el concepto de factor de camión, que es definido como el número de ESALs por vehículo. Este factor puede ser computado para cada clasificación general de camiones o para todos los vehículos comerciales como un promedio para una dada configuración de tránsito. Es más exacto considerar factores de camión para cada clasificación general de camiones.

Veamos este ejemplo:

Tabla II $P_t=2,5$ (serviciabilidad final)

Tipo de eje	Peso KN	Nº de ejes	LEF	Nº de ESALs
simple	80	500	1.00	500
simple	98	300	2.09	627
simple	116	200	3.91	782
tándem	142	400	.887	355
tándem	160	350	1.38	483
tándem	178	200	2.03	406
tándem	196	100	2.88	288
		2050 (1600 camiones)		3.441

$$\text{Factor de camión TF (truck factor)} = \frac{\text{No.ESALs}}{\text{No.camiones}} = \frac{3441}{1600} = 2.15 \quad (2.1)$$

Este es un factor de camión promedio, pero es conveniente completar factores de camiones para cada tipo de camión, a fin de tener un cómputo más exacto.

Es necesario recalcar que el eje delantero no está incluido en los factores de equivalencia de carga. Sin embargo, estudios recientes han indicado que el daño debido al eje delantero es mínimo. Estudios realizados han demostrado que el eje delantero contribuye en un 2.1 % para el ahuellamiento, 0.125% para fisuración y 1.31% para serviciabilidad. Por lo tanto, la eliminación del eje delantero en el desarrollo de los LEFs no afecta la exactitud del cálculo.

2.2.3 Procedimiento simplificado

Sirve para hacer una rápida estimación del número de ESALs. Este procedimiento se llama simplificado porque usa un factor de camión promedio en lugar de factores de camión para cada tipo de camión. El resultado no es muy exacto.

La fórmula a usar es:

$$ESAL = ADT * TKS * GF * DD * LD * TF * 365 \quad (2.2)$$

ADT = tránsito diario inicial promedio (*average daily traffic*)

TKS = porcentaje de camiones pesados (clase 5 o más según FHWA)

GF = factor de crecimiento (*growth factor*) que tiene en cuenta el crecimiento en volumen de camiones y en factor de camiones. Esto se obtiene de la Tabla 3.19, entrando una tasa de crecimiento compuesta:

$$GF = [(1+g_{tv}) \times (1+g_{tf})]^{-1} \quad (2.3)$$

Donde:

g_{tv} = crecimiento del volumen de tránsito

g_{tf} = crecimiento en el factor de camión

DD = factor de distribución direccional para camiones (en tanto por uno)

LD = factor de distribución por vía para camiones (en tanto por uno)

TF = factor de camiones (ESALs/camiones)

Este cálculo puede hacerse en forma manual o usando el programa DARWin.

Tabla III. Factores de crecimiento de tránsito

Periodo de análisis	Factor sin crecimiento	Tasa de crecimiento anual (g) (en %)						
		2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	15.0	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55

18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	25.0	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	30.0	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.4 3	138.2 4	172.32	271.02

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

* Factor = $[(1+g)^n - 1]/g$ donde $g = \text{tasa}/100$ y no debe ser nula. Si ésta es nula, el factor es igual al período de análisis.

2.2.4 Procedimiento de cálculo riguroso

El método riguroso requiere el uso de los factores de camión para cada clase individual de camiones (vehículos clase 5 o mayores según FHWA). Esto puede ser hecho usando tablas W-4 o pesos de vehículos y clasificación obtenidos por el método de pesado en movimiento o WÍM (*Weigh in motion*).

En este caso, el cálculo puede realizarse usando la siguiente planilla de Tabla 3.20.

1. En este caso, la columna A es el volumen diario contado para cada vehículo tipo.
2. La columna B tiene el factor de crecimiento para cada tipo de vehículo. El volumen de tránsito de la columna A multiplicado por el factor de crecimiento de la columna B nos da el tránsito de diseño que se pone en columna C. El factor de crecimiento depende de la tasa de crecimiento y del período de análisis y se obtiene de tabla 3.19. Cada tipo de vehículo

puede tener una tasa de crecimiento distinta, dado que no tienen por qué crecer al mismo ritmo.

3. La columna C es igual al producto de la A por la B y por 365 días y nos da la cantidad acumulada de vehículos de cada tipo en el período de análisis.
4. La columna D es el factor de ESAL para cada tipo de camión, obtenida como $N^{\circ} \text{ camiones} \times \text{TF}$.

Tabla IV. Planilla para el cálculo de ESALs

Ubicación: _____ Período de análisis: _____ años
SN o D: _____

Tipo de vehículo	Volumen diario	Factores de crecimiento	Tránsito de diseño	Factor de camión TF	No de ESALs p/diseño
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Autos					
Pick ups					
Otros veh. 2 ejes y 4 ruedas					
Camiones (2 ejes y .1 ruedas)					
Camiones (3 o más ejes)					
Total					
Semirremolques (3 ejes)					
Semirremolques (4 ejes)					
Semirremolques (5 o más ejes)					
Total					
Camión c/ acoplado (5 ejes)					
Camión					

c/acoplado (6 o mas ejes)					
Total					
Total vehículos				ESALs diseño	

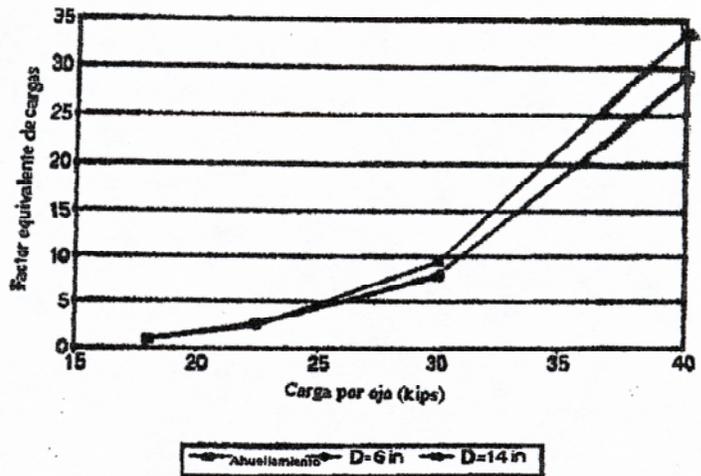
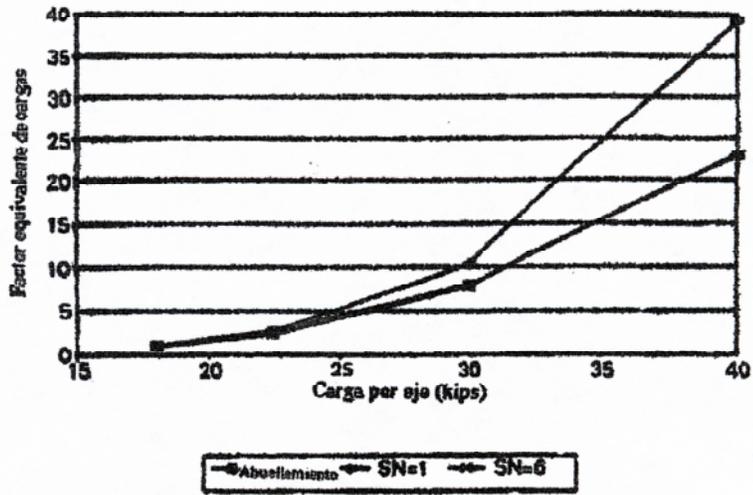
5. La columna E es el producto de la D por C. La suma de E es el número total de ESALs a usar para el diseño del pavimento, el cual debe afectarse por el factor de distribución direccional por trocha. Los vehículos clase 1 a 4, según FHWA, pueden ser despreciados ya que su efecto es muy bajo.

Este cálculo puede realizarse por el método tradicional o utilizando para ello el programa *DARWin*.

2.2.5. Factores equivalentes de carga para ahuellamiento

Los factores equivalentes desarrollados por el *Road Test de la AASHTO* tienen en cuenta la serviciabilidad, la cual está relacionada principalmente con la rugosidad. Sin embargo, no se puede asegurar que estos factores sean los mismos para otro tipo de deterioro. Carpenter (1992), usando datos del *Road Test de la AASHTO* determinó factores equivalentes para ahuellamiento. Concluyó que para ejes simples, los LEFs de ahuellamiento son similares a los dados por AASHTO para pavimentos flexibles de gran espesor o rígidos muy delgados.

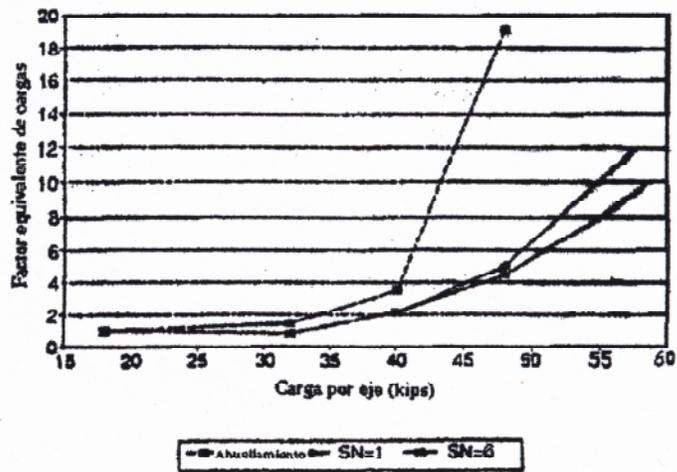
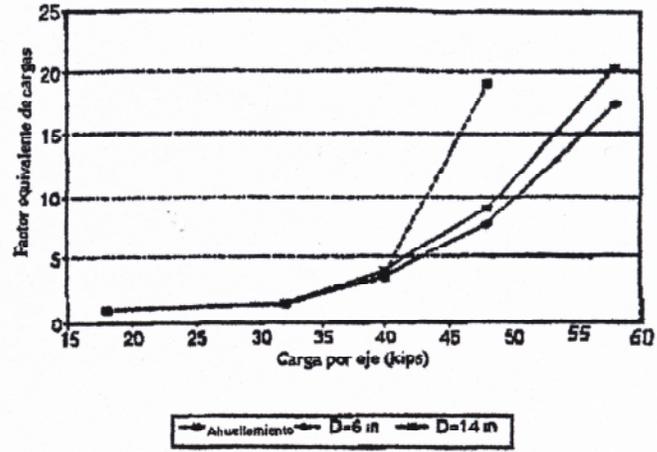
Figura 02. LEF's para ejes simples, pavimentos flexibles



Carpenter, 1992

Para ejes tándem, los LEFs para ahuellamiento siguen a los de los pavimentos rígidos de poco espesor, salvo para cargas muy pesadas. En el caso de pavimentos rígidos, los LEFs subestiman severamente a los LEFs basados en el ahuellamiento.

Figura 03. LEF's para pavimentos rígidos, ejes tándem



Carpenter, 1992

Carpenter dedujo ecuaciones para los LEFs para un ahuellamiento final determinado. Para ejes simples se tiene:

$$LEF = 1,83 \times 10^{-5} (RD)^{0,3854} (SW)^{3,89} \quad (2.6)$$

Para ejes tándem:

$$LEF = 1,113 \times 10^{-4} (RD)^{0,0279} (TW)^{2,778} \quad (2.7)$$

Donde:

RD = ahuellamiento final (pulg)

SW = carga por eje simple (kips)

TW = carga por eje tándem (kips)

2.3 Análisis de tránsito

2.3.1 Volúmenes de tránsito

En todo estudio de tránsito se deben coleccionar al menos dos datos: tránsito medio diario (ADT) y tránsito medio diario de camiones (ADTT). Estos pueden ser obtenidos a partir de censos de tránsito en el lugar de la futura construcción (si existe la ruta y va a ser pavimentada o repavimentada) o si es totalmente nueva, mediante censos de tránsito en lugares próximos. Hay mapas de volúmenes de tránsito que muestran el número de vehículos diarios en determinados lugares, pero son menos exactos que hacer un censo en un lugar determinado. El tránsito puede cambiar según el día de la semana o en forma estacional y el proyectista debe tenerlo en cuenta.

También es necesario conocer las tasas de crecimiento de tránsito, como así también la distribución por dirección y si se trata de un camino multitrocha, la distribución por trocha.

2.3.2 Volúmenes de camiones

Es necesario conocer el porcentaje de camiones presentes en el volumen de tránsito a estudiar, como así también la clasificación de estos camiones. Diferentes tipos de camiones llevan distintas cargas y su número no debería ser combinado sin un buen ajuste. El uso del porcentaje de camiones para calcular el número de ESALs por camión debe ser hecho a partir de determinaciones precisas de los diferentes tipos de camiones en la corriente del tránsito.

La FHWA reconoce trece clases distintas de vehículos para el cálculo de los ESALs. Estos son: motocicletas, automóviles, otros vehículos de dos ejes y

cuatro ruedas, ómnibus, camiones simples, 2 ejes, 6 ruedas; camiones simples, 3 ejes; camiones simples, 4 o más ejes; camiones semirremolques de 4 o menos ejes, camiones semirremolques de 5 ejes, camiones semirremolques de 6 o más ejes, camiones c/acoplado de 5 o menos ejes, camiones c/acoplado de 6 ejes y camiones c/acoplado de 7 o más ejes.

2.3.3 Peso de camiones

Así como la distribución del tipo de camiones es importante, lo es también la de los pesos. Esto es en función de las nuevas reglamentaciones en cuanto a cargas y a las variaciones en el esquema productivo de una zona o de todo el país en general. Los factores que se deben conocer en este rubro son el peso total del camión y la distribución por ejes de este peso.

2.3.3.1 Estaciones permanentes de control de cargas

El conocimiento de los pesos de camiones y de las distribuciones de cargas por eje fue determinado en el pasado mediante las estaciones de control de cargas. Este método tiene varias fallas. En primer lugar, el número de estaciones de control de cargas es limitado y, a menos que la estación de control de cargas esté próxima al área del proyecto, es discutible su aplicación directa al diseño del pavimento. Por otro lado, no todas las estaciones operan en forma continua. Algunas están abiertas sólo determinados días de la semana o bien en horas diurnas, por lo que las variaciones en tránsito de camiones y de cargas que ocurren durante el día o la semana no pueden ser registradas. Por otro lado, muchos camiones sobrecargados eluden la estación por caminos laterales cuando ésta está en operación o bien pasan delante de la misma cuando ésta no trabaja. Todos estos factores hacen que los datos obtenidos de una estación de control de cargas sean poco confiables.

2.3.3.2 Estaciones portátiles

Son usadas por distintas reparticiones viales con el propósito de obtener datos para un determinado proyecto. El hecho de que los datos sean obtenidos en el mismo camino o zona los hace más confiables, pero igual presentan los mismos problemas que las estaciones de control de cargas permanentes (trabajan determinados días a determinadas horas), aunque la elusión por parte de camiones sobrecargados es menor.

2.3.3.3 Pesaje en movimiento

Este tipo de pesaje (*weigh in motion* = WIM) es un avance importante en el monitoreo del tránsito. Consiste en dispositivos instalados en la calzada que registran las cargas dinámicas transmitidas por los vehículos mientras transitan a velocidades normales. En general los dispositivos para pesaje en movimiento son portátiles, pero también los hay permanentes. Este método ofrece un alto grado de flexibilidad en recolección y procesamiento de datos gracias al uso de computadoras. Los dispositivos de medida son colocados en cada trocha para conocer la distribución de cargas por trocha. Las ventajas del WIM son:

1. Eliminación de demoras para los camiones, dado que éstos son pesados mientras transitan a velocidades normales.
2. Eliminación casi total de elusión del control por parte de los camiones sobrecargados.
3. Incremento de seguridad por eliminación de la necesidad de reducir la velocidad, con la consecuente formación de colas.

4. Posibilidad de procesar un gran número de vehículos.
5. Reducción de costos.
6. Mejoramiento de la obtención de datos en cuanto a cantidad y calidad.

Los dispositivos para pesaje en movimiento son:

1. Dispositivos para pesaje en puentes. Un transductor de deformaciones es colocado en el apoyo de las vigas longitudinales de un puente. Estos transductores pueden ser permanentes o portátiles. En el caso de estos últimos, se montan en 30 minutos.
2. Paños capacitores (*capacitance pads*), en los cuales tres capas de acero separados por goma blanda hacen de sensores de peso. Estos paños capacitores son portátiles y se pueden instalar en media hora, aunque no deberían colocarse en pavimentos húmedos o mojados.
3. Células hidráulicas de carga, en las cuales dos plataformas rectangulares que contienen un pistón central lleno de aceite (elemento sensor) están permanentemente fijadas al pavimento. Este dispositivo se coloca en media hora.
4. Células de carga *strain gage*, en las que se colocan *strain gages* de resistencia eléctrica montados en una placa de soporte. Este dispositivo puede ser permanente o portátil.

5. Placas de flexión con *strain gages*, en las que una placa de acero con sensores de carga mide la deformación bajo carga. En general son permanentes.
6. Cables piezoeléctricos. Son cables de pequeño diámetro (3,2 mm.) que generan pequeños campos eléctricos cuando son comprimidos. Esta tecnología es relativamente nueva en EEUU, pero parece ser prometedora.

Una de las cuestiones discutibles es la exactitud de los pesajes en movimiento. La diferencia entre el WIM y pesajes estáticos es del 8% para cargas por eje y del 6% para cargas totales de camión. Otro de los problemas es la interpretación de los resultados. En el WIM se mide la carga dinámica, la que debido a la suspensión del vehículo y rugosidad de la calzada es diferente de la carga estática. Los resultados son muy similares a los estáticos para calzadas muy lisas y camiones circulando a bajas velocidades.

2.3.3.4 Componentes de un programa de monitoreo de tránsito

Este programa debe contar con:

1. Volumen de camiones para cada tipo de camión.
2. Tasa de crecimiento para cada tipo de camión.
3. Factores de camión para cada tipo de camión y su tasa de crecimiento.
4. Factores de distribución por trocha para cada tipo de camión.
5. Porcentaje de ESALs que tienen lugar durante el deshielo de primavera.

6. Porcentaje esperado de camiones que circulen a una velocidad que produce *creep* en verano.

2.3.3.5. Factor de distribución por dirección

En general es 0,5, es decir, que del total del flujo vehicular censado, la mitad va por cada dirección. En algunos casos puede ser mayor en una dirección que en otra, lo que debería deducirse del censo de tránsito.

Quizás es más importante la diferencia en peso entre los vehículos que van en una y otra dirección, como puede ser por la cercanía de una fábrica, por un puerto, etc.

2.3.3.6 Factores que afectan la exactitud del cálculo de los ESALs

- 1. Valor inicial de la serviciabilidad.** Este parámetro tiene un impacto significativo en la elección de los LEFs para el cálculo de los ESALs. Análisis recientes indican que los factores equivalentes de carga están influenciados por la serviciabilidad en el momento de la aplicación de la carga. Los LEFs aumentan a medida que la serviciabilidad baja.
- 2. Valor final de la serviciabilidad.** Este valor también influye en el valor del LEF. Esto resulta de la relación no lineal entre las cargas y el decremento de serviciabilidad. Por otro lado, las fallas producen una disminución en la serviciabilidad relacionada de una manera logarítmica con el número de cargas.
- 3. Resistencia del pavimento.** Si bien los LEFs varían de acuerdo al tipo de pavimento, esta diferencia no es grande y no se justifica hacer un cálculo iterativo en el cual el número estructural del pavimento converge al número estructural usado para el cálculo de los ESALs.

- 4. Composición del tránsito.** El flujo vehicular está compuesto por vehículos de distinto tipo y peso. Los vehículos livianos tienen una incidencia muy pequeña en el cálculo de los ESALs y pueden ser despreciados. Por el contrario, los vehículos pesados tienen una incidencia muy grande sobre los ESALs y cualquier variación en la cantidad de los mismos puede arrojar diferencias significativas en el valor final.
- 5. Peso y porcentaje de camiones.** Últimamente el número de camiones se está elevando proporcionalmente con respecto al de los automóviles y sus respectivas cargas también. Todo esto trae como consecuencia un fuerte incremento en el número de ESALs en los últimos años. Para obtener un buen resultado en el número de ESALs es necesario clasificar los camiones en sus distintas categorías, pesos y tasas de crecimiento por categoría.
- 6. Configuración de ejes.** Un eje tándem de 160 kN no produce el mismo daño que dos ejes simples de 80 kN cada uno. En la medida en que aumenten las cargas se pensarán nuevas configuraciones de ejes para mantener la carga por eje dentro de valores aceptables. Esta práctica, sin embargo, no garantiza una tasa similar de deterioro del pavimento. Para comparar distintas configuraciones de ejes, es necesario analizar su efecto sobre el pavimento, es decir, tensiones y deformaciones inducidas, y no extrapolar valores de LEFs de las tablas de la AASHTO.
- 7. Presión de neumáticos.** Los análisis de pavimentos fueron hechos considerando presiones de neumáticos entre 70 y 80 psi; sin embargo, medidas en Arizona e Illinois han dado valores comprendidos entre 90 y 130 psi. Un incremento en las presiones de neumático produce un

incremento de tensiones en el pavimento, creando diferentes tipos de falla que los previstos para la confección de los LEF de la AASHTO, aunque la rotura se limita a las capas más superficiales. En el *Road Test* de la AASHTO la presión de neumáticos era de 85 psi y no era una variable. Para pavimentos de gran espesor, la presión no afecta el número de ESALs que el pavimento puede soportar.

3. CONCEPTOS DE CONFIABILIDAD

3.1. Conceptos básicos de variabilidad

3.1.1. Valor medio, rango, desvío estándar y coeficiente de variación

La variabilidad es uno de los conceptos que más debe tener en cuenta el ingeniero proyectista de pavimentos. Todo está relacionado con la variabilidad en un pavimento: su diseño, construcción, rendimiento, mantenimiento y rehabilitación.

En el método AASHTO se usan como variables de entrada los módulos resilientes de la subrasante y de las distintas capas que forman el paquete estructural, coeficientes de drenaje, datos de tránsito, etc. Son variables que pueden variar, cada una de ellas, en un amplio rango. Es por esta razón que el ingeniero debe conocer los conceptos estadísticos más elementales para poder manejar estas variables en forma correcta.

La media o valor medio es el promedio aritmético de todas las observaciones medidas. Se lo obtiene sumando los valores de cada una de las observaciones y dividiendo el resultado por el número N de observaciones.

El rango es la diferencia entre el valor más alto de una dada observación y el valor más bajo. Nos da una idea de la exactitud de los datos.

El desvío estándar es una medida del desvío de los datos con respecto al valor medio. Cuanto menor sea el desvío estándar, los datos medidos estarán más próximos al valor medio. Por ejemplo, para la longitud de barras pasadoras en juntas de un pavimento de hormigón es de esperar un desvío estándar muy pequeño, sobre todo si ha habido un buen control en el corte de las barras. Por el contrario, para las máximas temperaturas en un mes es de esperar un gran desvío estándar.

El coeficiente de variación es la relación entre el desvío estándar y el valor medio.

Para fijar mejor los conceptos se usará este ejemplo. Sea una sección de un pavimento de hormigón de 7,3 m de ancho por 305 m de largo, hormigonado el mismo día, de donde se extrajeron 5 probetas para hacer ensayos de compresión simple que arrojaron los siguientes resultados.

Tabla V. Resultados de probetas para ensayos de compresión simple

Muestra	F_c (Mpa)
1	20.86
2	30.95
3	25.07
4	17.93
5	26.93

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

$$\text{Valor medio } f'_c = \sum \frac{f'_{ci}}{N} = \frac{20.86 + 30.95 + 25.07 + 17.93 + 26.93}{5} = 24.35 \text{ Mpa. (3.1)}$$

Rango $R = f'_{cmáx} - f'_{cmín} = 30.95 - 17.93 = 13.02 \text{ MPa}$. Ecuación (3.2)

$$\text{Desvío standard } SD_{f'_c} = \sqrt{\frac{f'_{ci}{}^2 - \left(\sum f'_{ci}\right)^2}{N}} \quad \text{Ecuación (3.3)}$$

$$SD_{f'_c} = \sqrt{\frac{20.86^2 + 30.95^2 + 25.07^2 + 17.93^2 + 26.93^2}{5-1}} = 5.10 \text{ MPa}$$

$$\text{Coeficiente de variación } COV_{f'_c} = \frac{SD}{Media} = \frac{5.10}{24.35} * 100 = 21\% \quad \text{Ecuación (3.4)}$$

Si existe un buen control de calidad en el caso de hormigones, el coeficiente de variación será del 15%. Si el control es pobre, este valor puede ascender al 20% o más. Estos coeficientes varían de acuerdo al material y a la variable a analizar. Por ejemplo, los espesores de losa varían muy poco, un 3%.

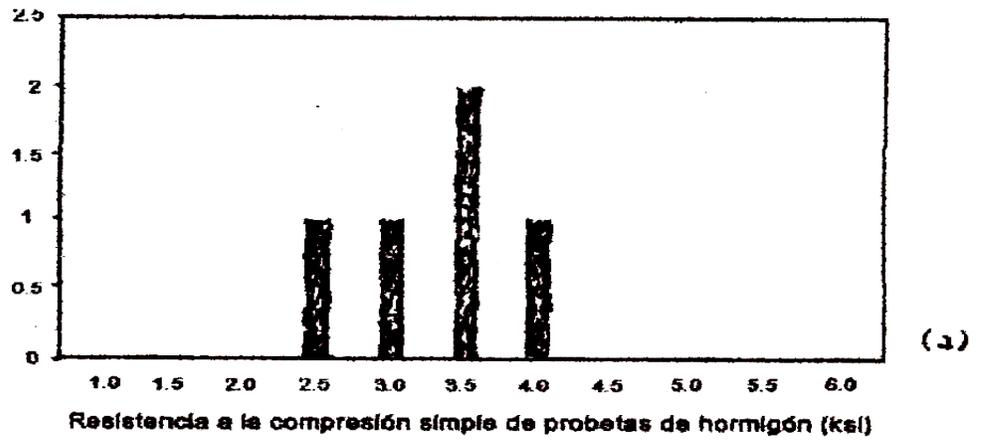
3.1.2. Muestra versus variación

La media o el desvío estándar de únicamente 5 muestras representan sólo una muestra estimada del verdadero valor medio de la sección del pavimento a estudiar. El valor verdadero de la media y el desvío estándar de la población sólo puede ser obtenido si se extraen muchísimas muestras para ensayar y esto es poco práctico. Podemos concluir que cuanto mayor sea el número de muestras estudiadas de una dada población, mejores serán los resultados.

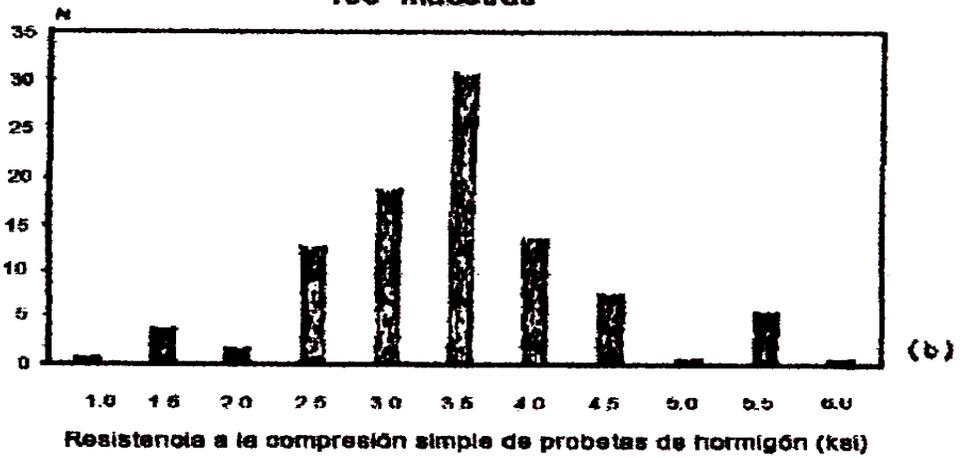
3.1.3. Distribución de variación

Para el ejemplo antes citado se han graneado en el histograma de la Figura 3.1.a los resultados obtenidos. Un histograma con un número tan reducido de muestras (5) no dice nada. En cambio, si se ensayan 100 muestras, el histograma tendrá una distribución como la de la Figura 3.2.b. En este caso ya puede observarse cómo es la tendencia de la distribución. Por último, si se ensayan muchísimas muestras, su histograma será como el de la Fig. 3.1.C. A este tipo de distribución se la llama distribución **normal**.

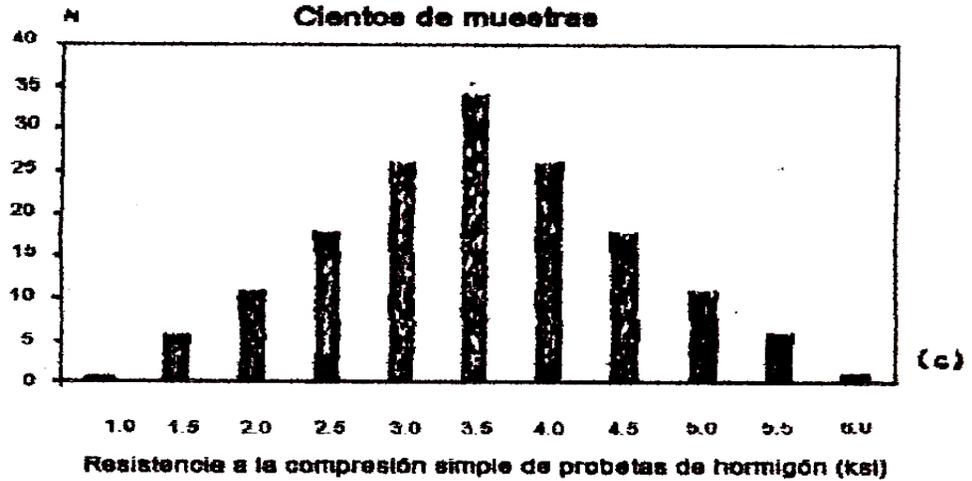
Figura 04. Ejemplo de distribuciones estadísticas



**Ilustración de distribución
100 muestras**



**Ilustración de distribución
Cientos de muestras**

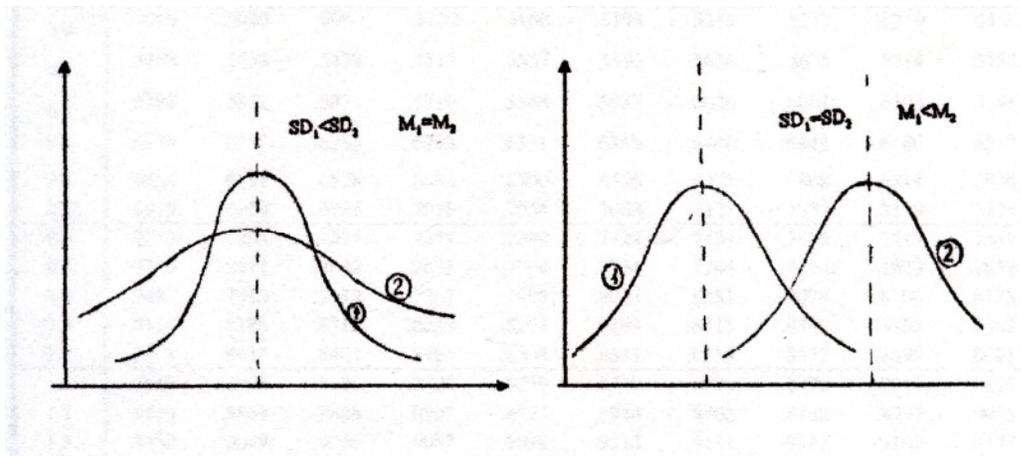


AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

La distribución normal es muy útil en trabajos de control de calidad o para estudiar los efectos de la variabilidad en el rendimiento y diseño de pavimentos y otras estructuras. Hay también otro tipo de distribuciones: log normal, gamma, uniforme, beta, etc.

La curva de distribución normal tiene forma de campana y depende de dos parámetros, la media y el desvío estándar. A mayor desvío estándar, más aplanada será la curva (mayor rango y mayor coeficiente de variación).

Figura 05. Ejemplo de distribuciones estadísticas



a)

b)

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

En el diseño de pavimentos las distribuciones más usadas son la normal y la log. normal.

Las curvas de distribución pueden ser estandarizadas y de esta manera conocer, por ejemplo, la probabilidad de que una variable sea mayor o menor

que un valor determinado. En una curva estandarizada el valor medio es 0 y el desvío estándar es 1 . El área bajo la curva entre $-\infty$ y $+\infty$ vale 1. Se han hecho tablas que indican el área bajo la curva hasta un dado valor (ver tabla 3.1).

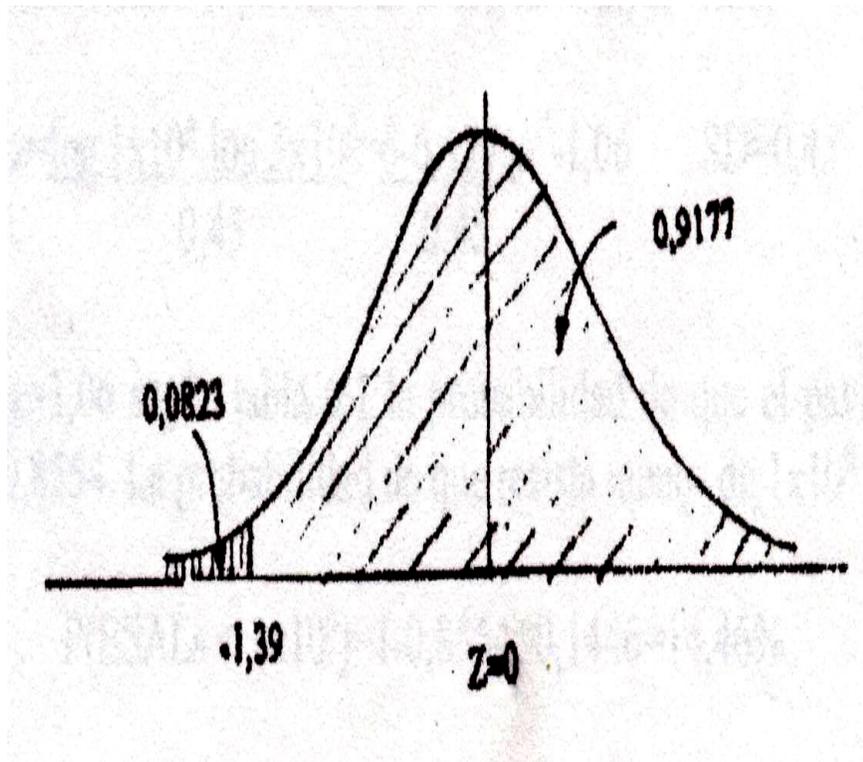
En nuestro ejemplo, se nos plantea la necesidad de saber cuál es la probabilidad de que el hormigón tenga una resistencia a la compresión simple menor de 17.24 Mpa.

$$\text{El valor } Z = \frac{X - \text{MEDIA}}{SD} = \frac{17.24 - 24.35}{5.10} = -1.39 \quad \text{Ecuación (3.5)}$$

Despreciando el signo negativo y entrando en tabla 6.1 para $z = -1.39$ se obtiene un área de 0.9177, que es la probabilidad de que la resistencia sea mayor que 17.24 Mpa. La probabilidad de que la resistencia sea mayor que este valor es el complemento a 1 (Fig.3.3), o sea:

$$P(f'_c < 17.24 \text{MPa}) = 1 - 0.9177 = 0.0823 = 8.23\%$$

Figura 06. Área bajo una curva de distribución normal



(Ang y Tang, 1975)

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

Tabla VI. Área bajo la curva de distribución normal (Ang y Tang, 1975)

Z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
0.0	.5000	.5040	.5080	.5120	.5160	.5199	.5329	.5279	.5319	.5359
0.1	.5398	.5438	.5478	.5517	.5537	.5596	.5636	.5675	.5714	.5753
0.2	.5793	.5832	.5871	.5910	.5948	.5987	.6026	.6064	.6103	.6141
0.3	.6179	.6217	.6255	.6293	.6331	.6368	.6406	.6443	.6480	.6517
0.4	.6554	.6591	.6628	.6664	.6700	.6736	.6772	.6808	.6844	.6879

0.5	.6915	.6950	.6985	.7019	.7054	.7088	.7123	.7157	.7190	.7224
0.6	.7257	.7291	.7324	.7357	.7389	.7422	.7454	.7486	.7517	.7549
0.7	.7580	.7611	.7642	.7673	.7704	.7734	.7764	.7794	.7823	.7852
0.8	.7881	.7910	.7939	.7967	.7995	.8023	.8051	.8078	.8106	.8133
0.9	.8159	.8116	.8212	.8238	.8264	.8289	.8315	.8340	.8365	.8389
1.0	.8413	.8438	.8461	.8485	.8508	.8531	.8554	.8577	.8599	.8621
1.1	.8643	.8665	.8686	.8708	.8729	.8749	.8770	.8790	.8810	.8830
1.2	.8849	.8869	.8888	.8907	.8925	.8944	.8962	.8980	.8997	.9015
1.3	.9032	.9049	.9066	.9082	.9099	.9115	.9131	.9147	.9162	.9177
1.4	.9192	.9207	.9222	.9236	.9251	.9265	.9279	.9292	.9306	.9319
1.5	.9332	.9345	.9357	.9370	.9382	.9394	.9406	.9418	.9429	.9441
1.6	.9452	.9463	.9474	.9484	.9495	.9505	.9515	.9525	.9535	.9545
1.7	.9554	.9564	.9573	.9582	.9591	.9599	.9608	.9616	.9625	.9633
1.8	.9641	.9649	.9656	.9664	.9671	.9678	.9686	.9693	.9699	.9706
1.9	.9713	.9719	.9725	.9732	.9738	.9744	.9750	.9756	.9761	.9767
2.0	.9772	.9778	.9783	.9788	.9793	.9798	.9803	.9808	.9812	.9817
2.1	.9821	.9826	.9830	.9834	.9838	.9842	.9846	.9850	.9854	.9857
2.2	.9861	.9864	.9868	.9871	.9875	.9878	.9881	.9884	.9887	.9890
2.3	.9893	.9896	.9898	.9901	.9904	.9906	.9909	.9911	.9913	.9916
2.4	.9918	.9920	.9922	.9925	.9927	.9929	.9931	.9932	.9934	.9936
2.5	.9938	.9940	.9941	.9943	.9945	.9946	.9948	.9949	.9951	.9952
2.6	.9953	.9955	.9956	.9957	.9959	.9960	.9961	.9962	.9963	.9964
2.7	0.9965	.9966	.9967	.9968	.9969	.9970	.9971	.9972	.9973	.9974
2.8	.9974	.9975	.9976	.9977	.9977	.9978	.9979	.9979	.9980	.9981
2.9	.9981	.9982	.9982	.9983	.9984	.9984	.9985	.9985	.9986	.9986
3.0	.9987	.9987	.9987	.9988	.9988	.9989	.9989	.9989	.9990	.9990
3.1	.9990	.9991	.9991	.9991	.9992	.9992	.9992	.9992	.9993	.9993
3.2	.9993	.9993	.9994	.9994	.9994	.9994	.9994	.9995	.9995	.9995

3.3	.9995	.9995	.9995	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9997
3.4	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9998

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

Veamos otro ejemplo: ¿Cuál es la probabilidad de que una sección de un pavimento soporte 1×10^6 ESALs? Se supone que el número de ESALs para llevar esta sección a una serviciabilidad final $p_t = 2.5$ es 3×10^6 . Como se supone que la distribución del número de ejes que hacen fallar el pavimento es log normal, se tiene:

$$Z = \frac{\log 1 \times 10^6 - \log 3 \times 10^6}{0.45} = \frac{6 - 6.4771}{0.45} = -1.06 \quad \text{SD}=0.45$$

Para $z = 1.06$ según tabla 6.1 la probabilidad de que el pavimento resista más de 1×10^6 ESALs es 0.8554. La probabilidad de que resista menos de 1×10^6 ESALs es:

$$P(\text{ESALs} < 1 \times 10^6) = 1 - 0.8554 = 0.1446 = 14.46\%$$

3.2 Ejemplos de variabilidad

Hay muchas fuentes de variabilidad en el diseño, construcción y comportamiento de pavimentos. He aquí algunos ejemplos.

3.2.1. Variabilidad en el diseño

El proyectista debe tener en cuenta ciertas variables de entrada en el diseño de un pavimento, como por ejemplo: cargas de tránsito futuras, condiciones climáticas futuras, propiedades de materiales y propiedades de la subrasante. Los valores reales de estas variables cuando el camino esté en funcionamiento pueden diferir mucho de las consideradas en el diseño.

Por ejemplo, analicemos los valores del ensayo R (Hveem) tomadas a partir de muestras sacadas del terreno previo a la construcción del camino y los obtenidos de la subrasante luego de la construcción.

Tabla VII. Resultado de muestras del ensayo de R (Hveem)

Parámetro	Pre construcción	Post construcción
Media	55	65
Rango	13-70	35-75
Desvío estándar	16	9

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

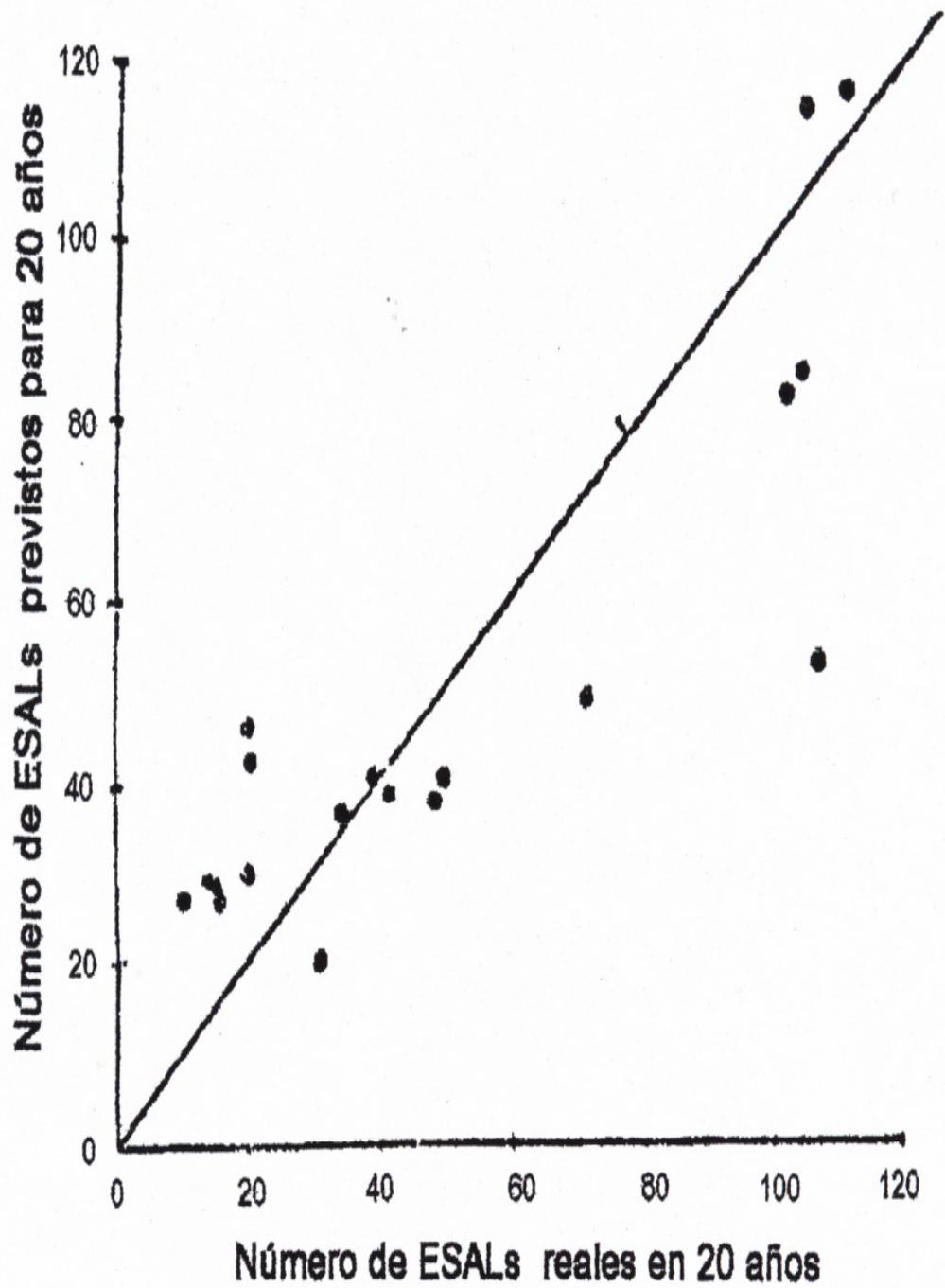
En este caso, los resultados obtenidos post construcción son mejores que los tomados para el proyecto. Se trata de un caso favorable, pero no siempre ocurre así y pueden presentarse problemas.

En este otro ejemplo se ha tomado una cuidadosa consideración en la predicción del tránsito futuro. Pero la estimación de este valor tiene un alto grado de incertidumbre, como los cambios en las distribuciones de ejes y un mayor o menor desarrollo económico que el previsto. Así, el tránsito previsto puede ser mayor o menor que el real, con diferencias muy significativas como se indica en Fig. 8.4. Si el tránsito real es mucho mayor que el previsto, la vida útil del pavimento se acortará.

3.2.2. Variabilidad en la construcción

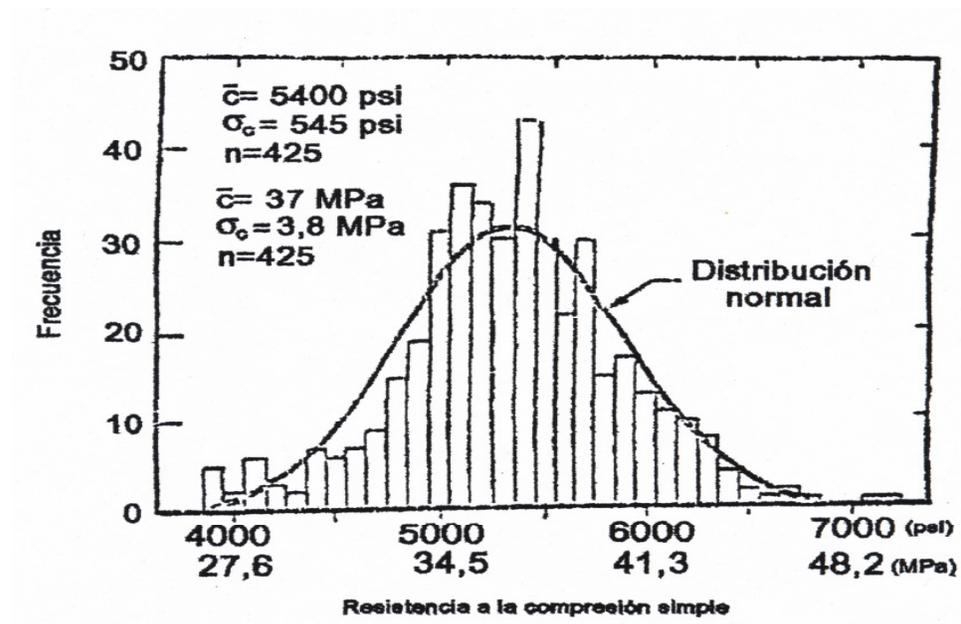
Prácticamente todo lo asociado con la construcción del pavimento implica gran variabilidad e incertidumbre. La variabilidad en los materiales ha sido bien estudiada y comprendida y puede acotarse sin problemas. Pero hay también variación en otros rubros como son la profundidad de colocación de armaduras (en pavimentos de hormigón armado), soporte de suelo, espesores de las distintas capas. En las Fig. 7.5, 7.6, 7.7 y 7.8 se dan ejemplos concretos.

Figura 07. Número de ESALS predichos y reales para un periodo de análisis de 20 años (Darter y Hudson,1973).

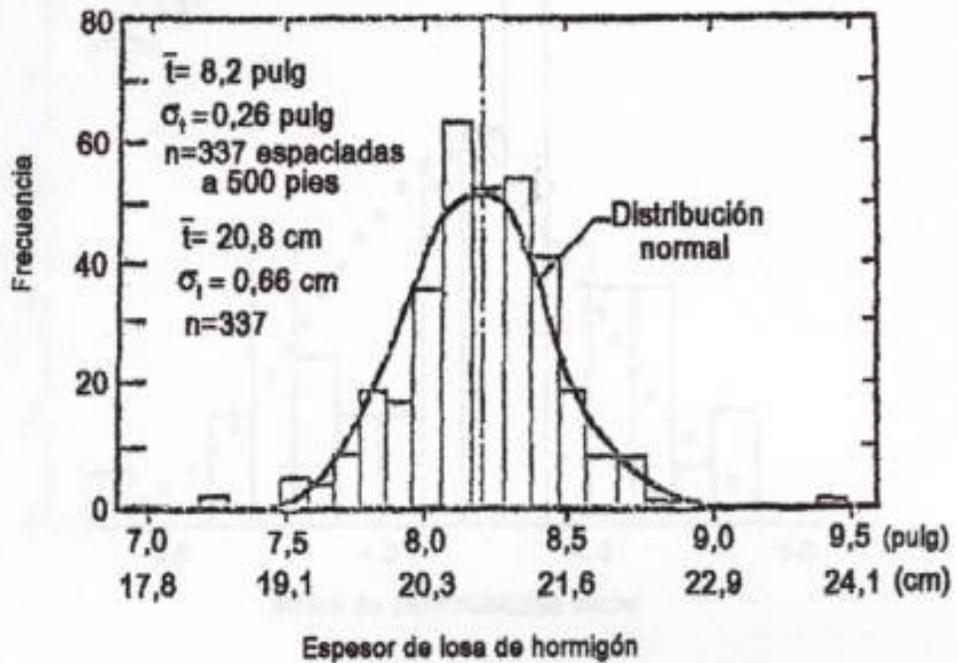


AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

Figura 08. Variación de la resistencia a la compresión simple de muestras extraídas de un tramo de pavimento de hormigón de 150 mts.

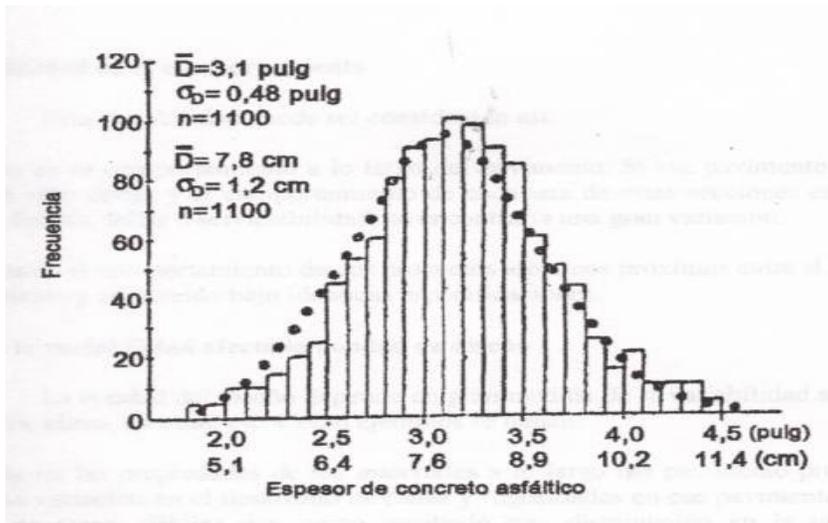


(Darter, 1976).



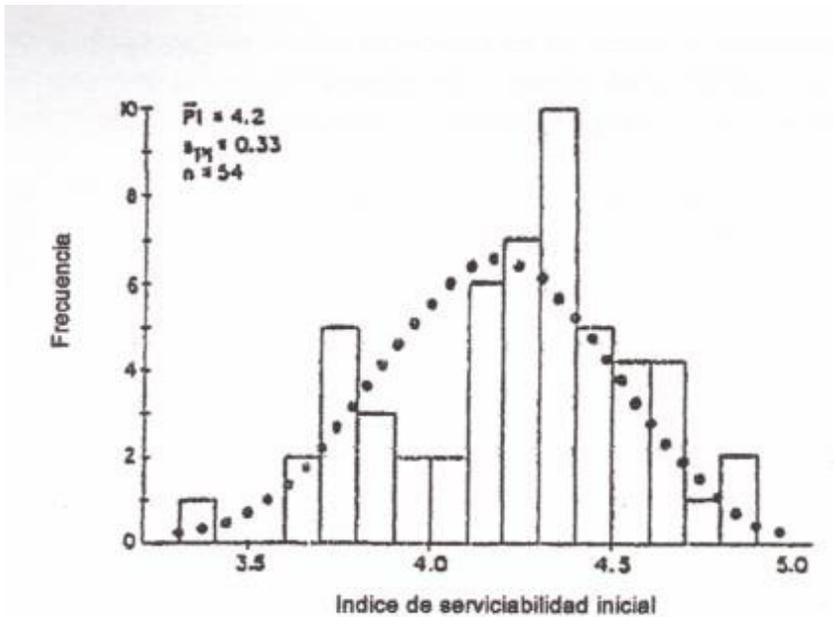
AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

Figura 09. Altura de probetas tomadas de un pavimento asfáltico (Miden el espesor del mismo) (Darter, 1973)



AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

Figura 10. Histograma del índice inicial de serviciabilidad para un



pavimento flexible nuevo (Darter y Hudson, 1973)

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

El comportamiento de un pavimento depende de la calidad de la construcción, pero esta calidad es muy difícil de cuantificar. Una manera interesante de observar los efectos de la variabilidad en la construcción y

materiales es observar el perfil de deflexiones de un pavimento inmediatamente después de la construcción y a lo largo del tiempo. Esta propiedad de materiales, propiedades de la subrasante y condiciones de drenaje.

3.2.3. Variabilidad en el comportamiento

Esta variabilidad puede ser considerada así:

a) Diferencias en el comportamiento a lo largo del pavimento. Si el pavimento es dividido en secciones muy cortas y el comportamiento de cada una de estas secciones es medido en términos de fisuras, fallas o serviciabilidad, se encontraría una gran variación.

b) Diferencias en el comportamiento de dos proyectos idénticos próximos entre sí, ubicados en el mismo camino y construidos bajo idénticas especificaciones.

3.2.4. Cómo la variabilidad afecta la bondad del diseño

La bondad del diseño depende en gran medida de la variabilidad asociada con los materiales, clima, tránsito, etc. Como ejemplos se tienen:

- a. La variación en las propiedades de los materiales a lo largo del pavimento produce como resultado una variación en el desarrollo de fallas y rugosidades en ese pavimento. Las fallas localizadas en zonas débiles dan como resultado una disminución en la vida útil del pavimento.

- b. La variación de la ubicación de los pasadores en las juntas y profundidad de colocación de armadura da como resultado una variación en el desarrollo de fallas y rugosidad a lo largo del pavimento. Las fallas localizadas producen una disminución en la vida útil del pavimento.

- c. La variación entre los datos de diseño del pavimento y los reales pueden significar un aumento o disminución de la vida útil del mismo. Por ejemplo, estimaciones de tránsito, clima, materiales, etc.

3.3 Concepto general de confiabilidad de diseño

3.3.1. Uso del concepto de confiabilidad

Este concepto fue utilizado por primera vez para el diseño de pavimentos flexibles en 1973 en Texas (*Texas Highway Department*). Los conceptos de confiabilidad fueron desarrollados e incorporados en los procedimientos de diseño AASHTO en 1973 (Kher y Darter) y finalmente fueron adoptados en la guía de diseño AASHTO de 1986.

La confiabilidad en el diseño de un pavimento puede definirse, de acuerdo a Darter y Hudson (1973), como la probabilidad de que el sistema estructural que forma el pavimento cumpla su función prevista dentro de su vida útil bajo las condiciones (medio ambiente) que tiene lugar en ese lapso.

La incertidumbre siempre ha sido tenida en cuenta a través del uso de coeficientes de seguridad surgidos con base en la experiencia. Cuanto mayor eran las incertidumbres, mayores eran los coeficientes de seguridad.

La aplicación de estos coeficientes de seguridad puede hacer que el pavimento resulte sobre o subdimensionado, dependiendo de las magnitudes de los coeficientes de seguridad y de la sensibilidad de los procedimientos de diseño. Una aproximación realista para encarar la incertidumbre es la que utiliza los coeficientes de seguridad que reflejan el monto de la variabilidad estadística asociada con cada uno de los parámetros en el proceso de diseño.

3.3.2. Definiciones de confiabilidad

Como ejemplo la confiabilidad estructural de una viga simplemente apoyada es:

$$R (\%) = 100 P(\text{resistencia} > \text{solicitación}) \quad (3.6)$$

Para un pavimento se tiene:

$$R (\%) = 100 P (N_t > N_T) \quad (3.7)$$

Donde:

N = número de ESALs de 80 kN que llevan al pavimento a su serviciabilidad final.

N_T = número de ESALs de 80 kN previstos que actuarán sobre el pavimento en su periodo de diseño (vida útil).

La probabilidad de falla de cualquier estructura es:

$$P_f = P(\text{solicitación} > \text{resistencia}) \quad (3.8)$$

Tanto la sollicitación S como la resistencia F son variables probabilísticas, entonces:

$$P_f = P(S > F) = P(d < 0) \quad (3.9)$$

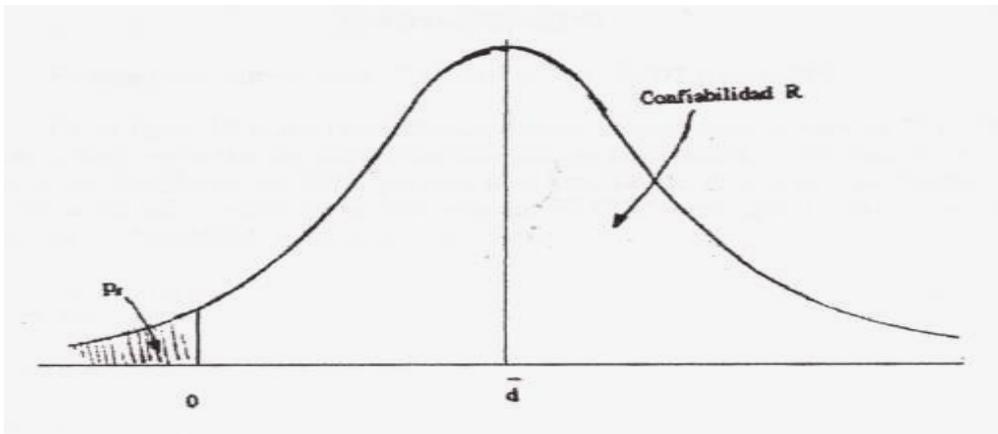
$$d = F - S \quad (3.10)$$

S = sollicitación sobre la estructura

F = resistencia

Como S y F tienen una distribución normal, d tendrá también una distribución normal.

Figura 11. Ilustración de los conceptos de probabilidad de falla y de confiabilidad



AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

Si usamos valores medios resulta: $d = F - S$ (3.11)

El desvío estándar de d , S_d , responde a esta expresión:

$$S_d = (s_s^2 + s_f^2)^{0.5} \quad (3.12)$$

Donde:

S_s = desvío estándar de las solicitaciones

S_f = desvío estándar de las resistencias

$$P_f = P(d < 0) = P(-\infty < d < 0) \quad (3.13)$$

Para calcular p_f o $R=1-p_f$ se deben usar tablas de distribución normal. Por ejemplo, para una losa de 178 mm. de espesor (7"):

$S = 2480$ kPa, tensión de tracción media en la sección más solicitada,

$F = 14760$ kPa, resistencia a la tracción por flexión de la losa,

$S_s = 330$ kPa

$S_f = 720$ kPa

$$S_d = (330^2 + 720^2)^{0.5} = 792 \text{ KPa.}$$

Luego, transformando el parámetro d para una distribución estandarizada con media nula, se tiene:

$$Z = \frac{d - \bar{d}}{S_d} = \frac{0 - \bar{d}}{S_d} = \frac{0 - 2,280}{792} = -2.88$$

$$d = 4,760 - 2,480 = 2,280$$

El área de la curva hasta $-2,88$ es $1 - 0,998 = 0,002$ y $P_f = 0.2\%$.

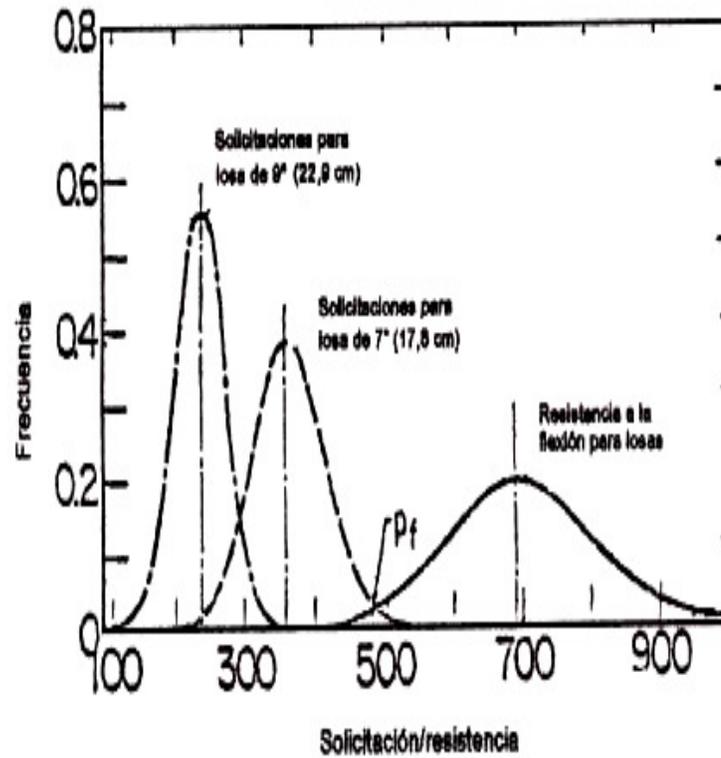
En la Fig. 7.10 están las distribuciones normales para la losa de 7" (17,5 cm.) y se observa un solape entre las curvas de distribución de resistencia y sollicitación. El área de solape no es la probabilidad de falla, pero sí una función de la misma. La figura muestra también la curva de sollicitación para una losa de 9" (22.5 cm), que como es mucho más resistente, da una probabilidad de falla mucho menor.

Para el caso de un pavimento, las variables a analizar pueden ser el número de repeticiones de ESALs:

$$R (\%) = 100 P (\log N_t > \log N_T) = 100 P((\log N_t - \log N_T) > 0) = 100 P(D > 0) \quad (7.14)$$

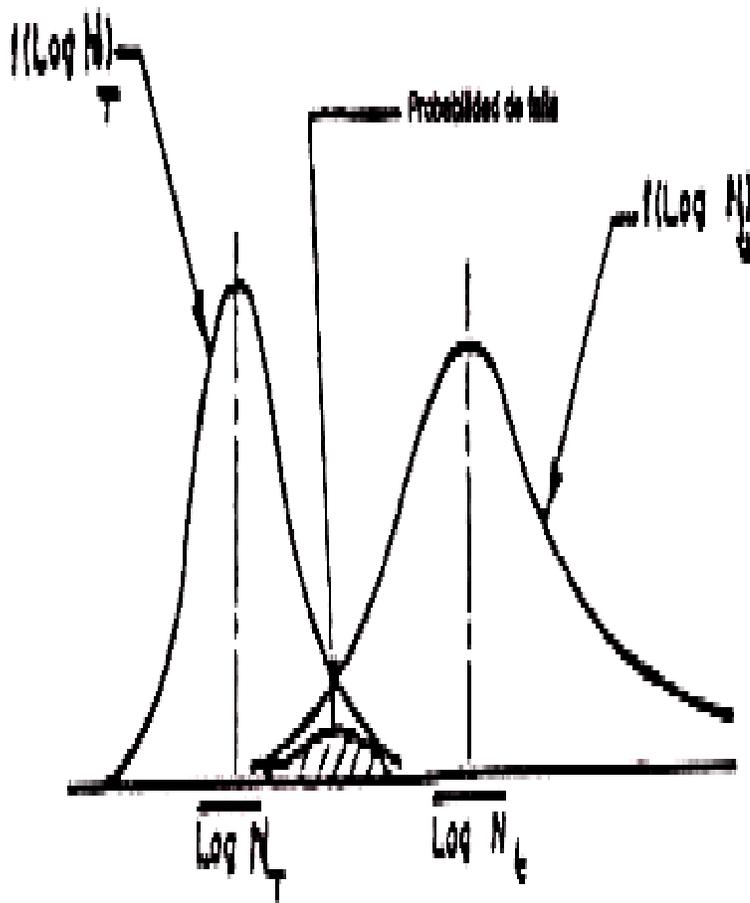
$$\text{siendo } D = \log(N_t) - \log(N_T) \quad (7.15)$$

Figura 12. Ilustración de la distribución de la resistencia a la flexión y las distribuciones estimadas de las tensiones aplicadas a la losa usando el modelo de carga en el borde de Westergaard (Darter, 1974)



AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

**Figura 13. Ilustración de la distribución del $\log N_T$ y $\log N_t$
 Como $\log N_t$ y $\log N_T$ tienen distribución normal,
 D tendrá también distribución normal**



AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

$$D = \overline{\text{Log } N_t} - \overline{\text{Log } N_T} \quad (3.16)$$

El desvío estándar de D es:

$$SD=[(s_{\log NT})^2 + (S_{\log NT})^2]^{0,5} \quad (3.17)$$

Pasando a una curva normalizada:

$$Z = \frac{D - \bar{D}}{SD} \quad (3.18)$$

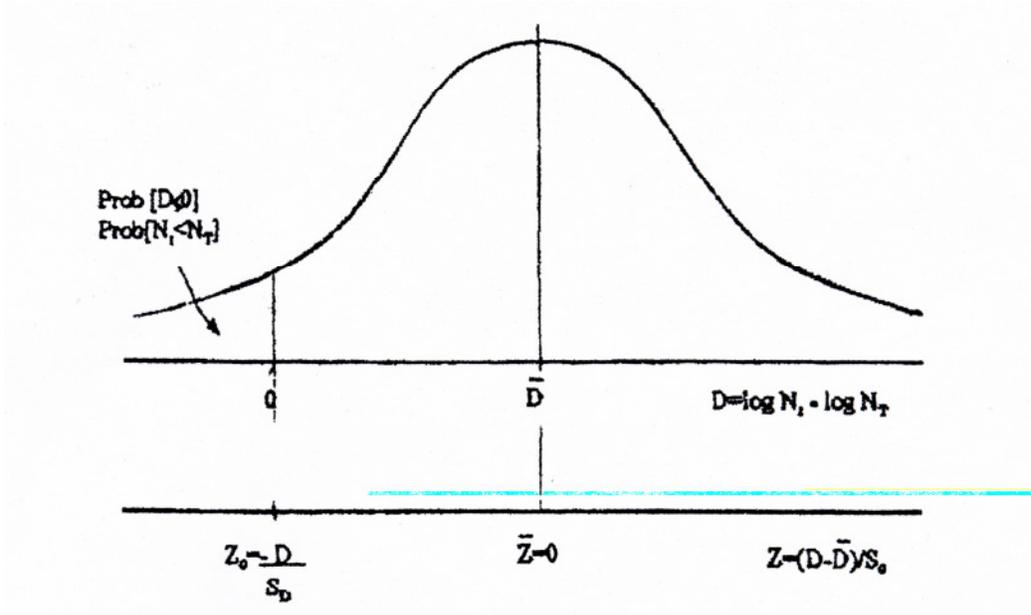
$$\text{Para } D=0 \quad Z=Z_0 = \frac{-\bar{D}}{SD} \quad (3.19)$$

$$\text{Para } D = \infty \quad Z = Z_{\infty} = \infty \quad (3.20)$$

La expresión de la confiabilidad es:

$$R(\%)=100(Z_0 < Z < Z_{\infty}) \quad (3.21)$$

Figura 14. Ilustración de la confiabilidad en una curva de distribución normal



AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

3.3.3. Aplicación de la confiabilidad al diseño

El siguiente procedimiento permite diseñar un pavimento para un nivel predeterminado de confiabilidad. La varianza $(SD)^2$ del comportamiento del pavimento y el tránsito estimado en el período de diseño pueden ser determinados para un caso de diseño en particular si se dispone de suficiente información o, en caso contrario, se pueden usar los valores de la Tabla VIII. Estos valores fueron desarrollados a partir de un análisis de varianza que existía en el AASHTO *Road Test* y con base en predicciones futuras de tránsito.

Tabla VIII. Valores de desvío estándar para diferentes condiciones de diseño

Condición de diseño	Desvío estándar
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito	0.34 (pavimentos rígidos)
	0.44 (pavimentos flexibles)
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito	0.39 (pavimentos rígidos)
	0.49 (pavimentos flexibles)

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

El número de ESALs de diseño para una dada confiabilidad es:

$$\text{Log} (\text{ESALs}_{\text{diseño}}) = \log N_t Z_R \text{SD} \quad (3.22)$$

Z_R = valor de Z (área bajo la curva de distr.)

correspondiente a la curva estandarizada. Por ejemplo, para $R=90\%$, $Z_R=1,28$

SD = desvío estándar, valor obtenido de la tabla VIII.

Ejemplo:

Sea $N_T = 1 \times 10^6$ $R=90\%$ $SD=0,49$

$$\text{Log} (\text{ESALs}_{\text{diseño}}) = \log 1 \times 10^6 + 1.28 \times 0.49 = 6.6272$$

$$\text{ESALs}_{\text{diseño}} = 4.238 \times 10^6$$

Esto significa que el pavimento va a diseñarse para 4.238×10^6 ESALs en lugar de los 1×10^6 previstos. La diferencia entre estos valores es un coeficiente de seguridad cuyo propósito es tener en cuenta la incertidumbre y variabilidad en el diseño, construcción y cargas.

Veamos qué pasa si bajamos la confiabilidad:

$$\text{Sea } N_T = 1 \times 10^6 \quad R = 70\% \quad Z_R = -0,53 \quad SD = 0,49$$

$$\text{Log (ESALs}_{\text{diseño}}) = \log 1 \times 10^6 + 0,53 \times 0,49 = 6,2597$$

$$\text{ESALs}_{\text{diseño}} = 1.818 \times 10^6$$

El número de ESALs es menor, con lo cual resultará un pavimento de menor espesor, pero más expuesto a fallas, dado que ahora hay un 30% de probabilidades de que el pavimento se rompa antes de completar su período de diseño.

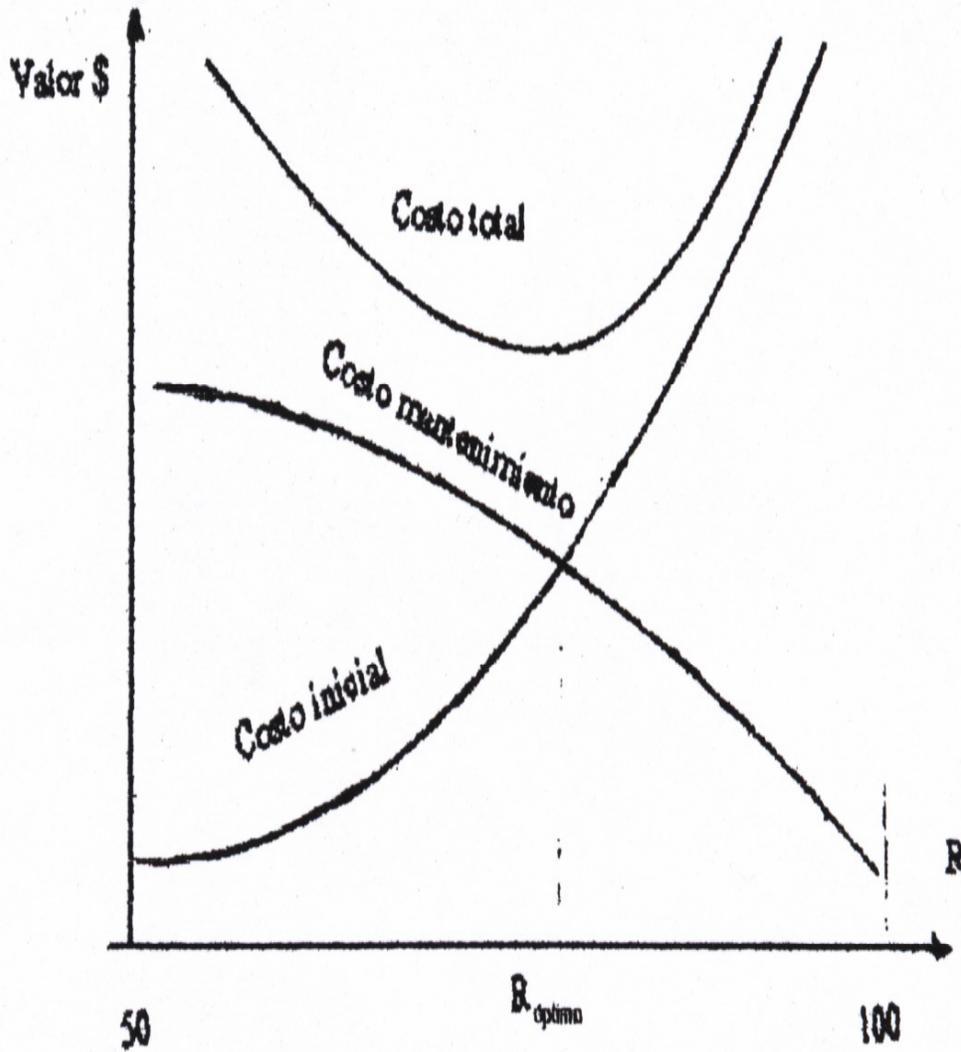
3.3.4. Selección del nivel de confiabilidad

La selección del nivel apropiado de confiabilidad para el diseño de un pavimento está dictada por el uso esperado de ese pavimento. Un subdimensionado de un pavimento tiene consecuencias más graves para un pavimento en el cual se espera que lleve un gran volumen de tránsito (por ejemplo una autopista urbana) que un pavimento que experimentará un bajo volumen de tránsito. En ambos casos habrá problemas, el pavimento alcanzará los niveles mínimos de serviciabilidad antes de lo previsto y será necesario realizar trabajos de reparaciones. Lo que sí debe quedar claro es que los costos de rehabilitación para el caso de la autopista urbana serán mucho mayores que para el camino rural de bajo tránsito.

Un nivel de confiabilidad alto implica un pavimento más costoso y por lo tanto mayores costos iniciales, pero también pasará más tiempo hasta que ese

pavimento necesite una reparación y por ende los costos de mantenimiento serán menores. Por el contrario, un nivel de confiabilidad bajo da pavimentos más económicos, pero con un mayor costo de mantenimiento. Con base en lo dicho, hay un nivel de confiabilidad óptimo en el cual la suma de los costos iniciales y de mantenimiento da un mínimo (Tabla XIV).

Figura 15. Confiabilidad óptima corresponde al costo total mínimo



AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

Tabla IX. Niveles de confiabilidad aconsejados por la AASHTO

Tipo de camino	Confiabilidad recomendada	
	Zona urbana	Zona rural
Rutas interestatales y autopistas	85-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-99
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

Aunque la clasificación funcional de caminos es un factor muy importante a tener en cuenta, confiabilidad a adoptar no está basada sólo en este criterio. En la guía de diseño AASHTO, niveles de confiabilidad altos indican que la consecuencia de falla es muy grave. Niveles altos de tránsito traen como consecuencia un deterioro más rápido y también un mayor costo de rehabilitación; es por eso que los niveles de confiabilidad deben tener en cuenta las consecuencias de la falla.

4. DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

4.1 Antecedentes

El primer antecedente en el diseño de pavimentos según el método AASHTO se tiene con el *AASHTO Road Test*, que fue un ensayo realizado sobre pavimentos de determinadas características bajo diferentes cargas en Ottawa, Illinois, entre 1958 y 1960. De estos ensayos se obtuvo información para ser aplicada en la metodología de diseño de pavimentos. Así aparece la *AASHTO Interim Guide for the Design of Rigid and Flexible Pavements* (1962) que contenía procedimientos de diseño basados en modelos empíricos deducidos de datos recolectados en el *AASHTO Road Test*.

Luego aparece la *AASHTO Interim Guide for the Design of Pavement Structures* en 1972 y, luego de hacer observaciones a partir de 1983, aparece en 1986 la *AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures* con muchas modificaciones con respecto a la de 1972 (se tiene en cuenta la confiabilidad, módulos resilientes de materiales, coeficientes de drenaje y efecto de subrasantes expansivas o sometidas a congelación y deshielo). Finalmente, en 2003 fue hecha una versión revisada de esta guía, donde se ofrecen los más innovadores e importantes adelantos en la tecnología estructural.

La fórmula original deducida del *AASHTO Road Test* era:

$$\text{Log } W = \log p + G/\beta \quad (4.1)$$

Donde:

W = número de cargas de ejes tipo aplicadas hasta la serviciabilidad final.

G = una función (el logaritmo) de la relación de pérdida de serviciabilidad en el tiempo t con respecto a la pérdida potencial para una serviciabilidad de 1,5.

P = función del diseño y de las cargas que influyen en la forma de la curva p (serviciabilidad) vs. W.

$$\beta = 0.40 + \frac{0.081(L_1 + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad (4.2)$$

Donde:

SN = número estructural

L₁ = carga por eje simple o eje tándem

L₂ = código de ejes (1 para eje simple, 2 para eje tándem)

p es una función del diseño y de las cargas que tiene en cuenta el número de aplicaciones de cargas para llevar la calzada a una serviciabilidad de 1,5.

$$\log p = 5.93 + 9.36 \log(SN + 1) - 4.79 \log(L_1 L_2) + 4.33 \log L_2 \quad (4.3)$$

Para el método de diseño AASHTO 2002 la fórmula de diseño es:

$$\text{Log} W_{18} = Z_r + S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 \frac{\log(\Delta PSI)}{0.40 + \frac{4.2 - 1.5}{1094}} + 2.32 \text{Log} M_R - 8.07$$

$$\frac{4.2 - 1.5}{1094} \frac{1}{(SN + 1)^{5.19}}$$

Donde:

SN = número estructural (pulg.)

W_{18} = número de cargas de 18 kips (80 kN) previstas

Z_R = abscisa correspondiente a un área igual a la confiabilidad R en la curva de distribución normalizada

S_0 = desvío estándar de todas las variables

Δ PSI = pérdida de serviciabilidad

M_R = módulo resiliente de la sobrasarte (en psi)

En cuanto a la modificación que aparece en el número estructural SN con motivo de la implementación del programa DARWin 3.0 que permite el diseño de un pavimento flexible en unidades inglesas o métricas. La modificación consiste en que el número estructural deja de ser un adimensional para convertirse en un parámetro con unidades de longitud, que representa un espesor ficticio de pavimento. En unidades inglesas es expresado en pulgadas y conserva el valor numérico obtenido mediante la expresión 8.4. En el sistema métrico es expresado en mm. y su valor es igual a SN (en pulg.) multiplicado por 25.4.

4.2. Variables de entrada

Se describen a continuación las variables a considerar en el método AASHTO.

4.2.1. Variables de tiempo

Hay dos variables a tener en cuenta: período de análisis y vida útil del pavimento. La vida útil es el período que media entre la construcción o rehabilitación del pavimento y el momento en que éste alcanza un grado de serviciabilidad mínimo. El período de análisis es el tiempo total que cada estrategia de diseño debe cubrir. Puede ser igual que la vida útil, pero en casos en donde se prevén reconstrucciones a lo largo del tiempo, el período de análisis comprende varios períodos de vida útil, el del pavimento original y el de los distintos refuerzos. Los períodos de análisis recomendados son los siguientes.

TABLA X. Periodos de análisis recomendados para implementar estrategias de diseño

Tipo de camino	Período de análisis
Gran volumen de tránsito urbano	30-50 años
Gran volumen de tránsito rural	20-50 años
Bajo volumen pavimentado	15-25 años

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

4.2.2. Tránsito

Se usa el número de repeticiones de ejes equivalentes de 18 kips (80 kN) o ESALs. La conversión de una carga dada por eje a ESAL se hace a través de los LEF (factores equivalentes de carga).

4.2.3. Confiabilidad

Se refiere al grado de certidumbre de que un diseño dado puede llegar al fin de su período de análisis en buenas condiciones.

Para una construcción por etapas (vida útil < período de análisis) se deben componer las confiabilidades de cada etapa para tener la confiabilidad en todo el período de diseño. Así se tiene:

$$R_{etapa} = (R_{total})^{1/n} \quad \text{Ecuación (4.2)}$$

N es el número de etapas previstas.

4.2.4. Subrasantes expansivas o sometidas a expansión por congelación

Si se tiene una subrasante expansiva o bien sometida a expansión por congelamiento, habrá una pérdida adicional de serviciabilidad que debe ser tomada en cuenta. Esto se hace analizando la pérdida de serviciabilidad por esta causa en función del tiempo mediante estudios hechos sobre los materiales existentes en el proyecto.

4.2.5. Criterios de adopción de niveles de serviciabilidad

La serviciabilidad de un pavimento se define como la capacidad de servir al tipo de tránsito para el cual ha sido diseñado. Así se tiene un índice de serviciabilidad presente PSI (*Present Serviciability Index*) mediante el cual el pavimento es calificado entre 0 (pésimas condiciones) y 5 (perfecto). En el diseño del pavimento se deben elegir la serviciabilidad inicial y final. La inicial, p_0 , es función del diseño del pavimento y de la calidad de la construcción. La final o

terminal, p_t , es función de la categoría del camino y es adoptada con base en ésta y al criterio del proyectista. Los valores recomendados son:

Serviciabilidad inicial:

P_0 = para pavimentos rígidos

P_0 = 4,2 para pavimentos flexibles

Serviciabilidad final:

p_t = 2,5 o más para caminos muy importantes

P_t = 2,0 para caminos de menor tránsito

4.2.6. Propiedades de los materiales

Como ya se ha hablado, la variable que se usa aquí es el módulo resiliente y en función de los mismos se obtienen los coeficientes estructurales o de capa.

4.2.7. Drenaje

En el método AASHTO los coeficientes de capa se ajustan con factores mayores o menores que la unidad para tener en cuenta el drenaje y el tiempo en que las capas granulares están sometidas a niveles de humedad próximos a la saturación.

4.3. Determinación de espesores

Ya se han presentado la ecuación de diseño para pavimentos flexibles y las variables de entrada. La ecuación puede ser resuelta en forma manual, lo cual es muy tedioso, o por medio de ábacos, como el de Fig. 9.1, que es mucho más rápido aunque menos preciso por los errores al trazar las líneas con lápiz. Es

conveniente tener un programa de computación con lo cual se logra exactitud y rapidez en la obtención de los resultados.

Con la fórmula de diseño se obtiene un valor llamado **número estructural** SN (*Estructural Number*) y, en función del mismo, se determinan los distintos espesores de capas que forman el paquete estructural.

Las variables de entrada en este ábaco de diseño son:

- Tránsito estimado por vía, W_{18} , a lo largo de la vida útil del pavimento
- Confiabilidad R
- Desvío estándar de todas las variables SQ
- Módulo resiliente efectivo (que tenga en cuenta las variaciones a lo largo del año) de la subrasante M_R
- Pérdida de serviciabilidad ΔPSI .

La expresión que liga el número estructural con los espesores de capa es:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3 \quad (4.3)$$

Donde:

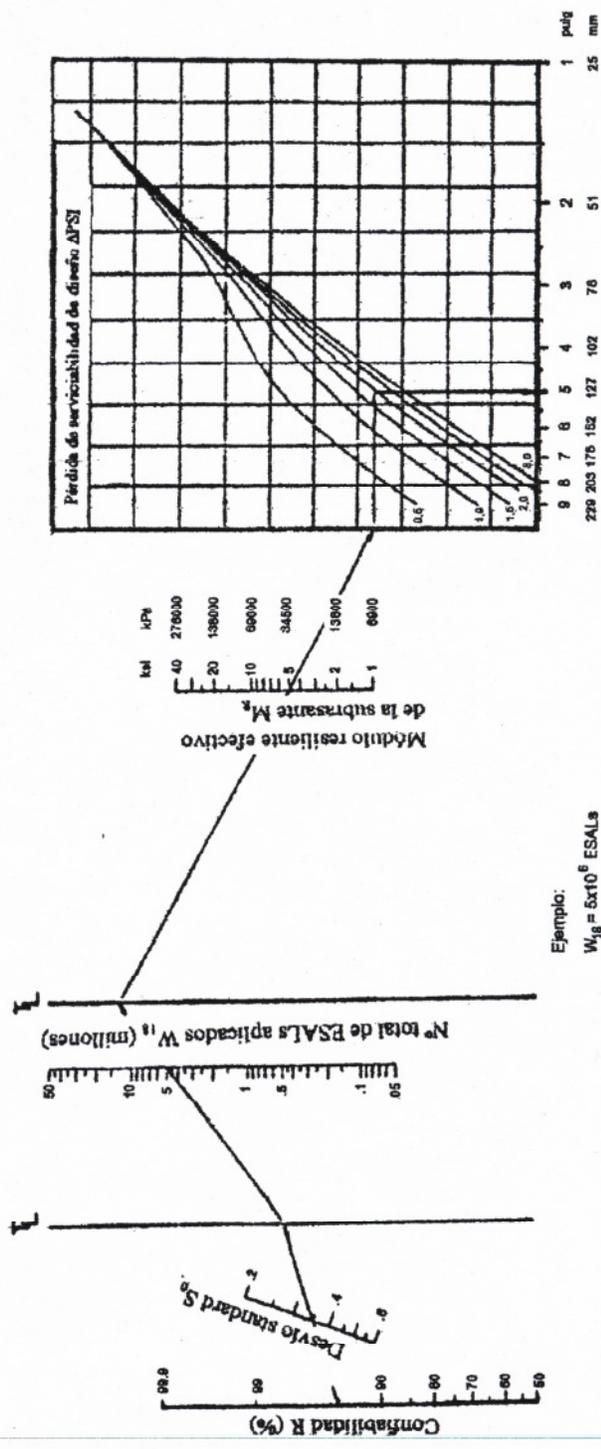
a_1 , a_2 , a_3 , son los coeficientes estructurales o de capa, adimensionales, de acuerdo a programa DARWin 3.0.

m_2 , m_3 son los coeficientes de drenaje

D_1 , D_2 , D_3 son los espesores de capas, en pulg. o cm.

Esta ecuación no tiene una única solución, hay muchas combinaciones de espesores que la pueden satisfacer. No obstante, se dan normativas tendientes a dar espesores de capas que puedan ser construidas y protegidas de deformaciones permanentes por las capas superiores más resistentes. A continuación se hablará sobre estas normativas.

Figura 16. Ábaco de diseño AASHTO para pavimentos flexibles



Ejemplo:
 $W_{18} = 5 \times 10^6$ ESALs
 $R = 95\%$
 $S_0 = 0.36$
 $M_R = 5000$ psi
 $\Delta PSI = 1.9$
 Solución: $SN = 5.0$

Número estructural de diseño SN

4.3.1. Estabilidad y factibilidad de construcción

No es práctico ni económico colocar capas de un espesor menor que el mínimo requerido. Además, las capas de un cierto espesor por encima de un mínimo son más estables. Muchas veces se especifica un número de espesor de capas para mantener la estructura del pavimento por encima del nivel de congelamiento o para mitigar los efectos de los suelos expansivos.

Muchas reparticiones establecen los espesores mínimos para tratamientos superficiales. El espesor de una capa de tratamiento superficial es despreciable en lo que se refiere al porcentaje de SN absorbido, pero tiene gran efecto en la base y sub-base, ya que reduce la entrada de agua en la estructura del pavimento.

En la tabla 9.2 se dan valores de espesores mínimos sugeridos para capas de concreto asfáltico y base granular en función del tránsito.

Tabla XI. Espesores mínimos de concreto asfáltico y base granular

Número de ESALs	Concreto asfáltico	Base granular
Menos de 50,000	2.5 cm.	10 cm.
50,000-150,000	5.0 cm.	10 cm.
150,000-500,000	6.5 cm.	10 cm.
500,000-2.000,000	7.5 cm.	15 cm.
2.000,000-7000,000	9.0 cm.	15 cm.
Más de 7.000,000	10.0 cm.	15 cm.

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

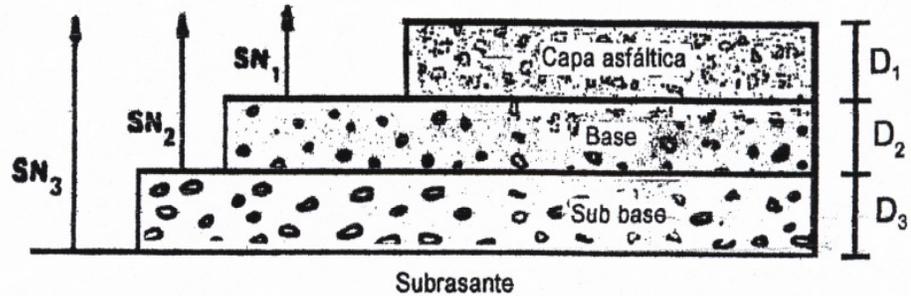
4.3.2. Espesores mínimos en función del número estructural

Esto se basa en el concepto de que las capas granulares no tratadas deben estar protegidas de tensiones verticales excesivas que les producirían deformaciones permanentes. El proceso está indicado en la Tabla 4.2 y se explica a continuación.

En primer lugar, los materiales son seleccionados para cada capa, por ejemplo, una capa de concreto asfáltico en caliente, una base tratada con asfalto y una sub-base granular. Se conocen los módulos resilientes de cada capa. Usando el ábaco de Fig. 4.2 se pueden determinar los números estructurales requeridos para proteger cada capa no tratada, reemplazando el módulo resiliente de la subrasante por el módulo resiliente de la capa que está inmediatamente abajo. Así, para determinar el espesor D_1 de la capa de concreto asfáltico, se supone un M_p igual al de la base y así se obtiene el SN que debe ser absorbido por el concreto asfáltico. El espesor D_1 debe ser:

$$D_1 > \frac{SN_1}{a_1} \quad (4.4)$$

Figura 17. Integración de las variables a aplicar en el proceso espesores en la estructura vial



AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

Se adopta un espesor, D_1^* , ligeramente mayor. El número estructural absorbido por esta capa es:

$$SN_1^* = a_1 D_1^* \quad (4.5)$$

Para determinar el espesor mínimo de la base, se entra al ábaco con el M_R de sub base y entonces se obtiene el SN_2 a ser absorbido por concreto asfáltico y base, así:

$$D_2 > \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 m_2} \quad (4.6)$$

Se adopta un espesor ligeramente mayor, D_2^* , y el número estructural absorbido será:

$$SN_2^* = a_2 m_2 D_2^* \quad (4.10)$$

Por último, para la sub base se entra con el M_R correspondiente a subrasante y se obtiene $SN_3 = SN$ para todo el paquete estructural ya calculado. En este caso el espesor es:

$$D_3 \geq \frac{SN - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3} \quad (4.7)$$

Se adopta un espesor ligeramente mayor, D_3^* , y se obtiene el número estructural absorbido por la sub-base:

$$SN_3^* = a_3 m_3 D_3^* \quad (4.8)$$

Como verificación:

$$SN_1^* + SN_2 + SN_3^* \geq SN \quad (4.9)$$

Con este criterio cada capa del paquete estructural resulta protegida. Este procedimiento no es aplicable para determinar espesores de capas sobre otras que tengan un módulo resiliente mayor de 280 Mpa (40,000 psi). En este caso, el espesor de la capa situada encima será establecido con base en la relación costo-eficiencia y espesores mínimos desde el punto de vista constructivo.

Ejemplo:

Calcular este paquete estructural en base al criterio de espesores mínimos, donde $R=90\%$ $S_0=0,35$ $W_{18}= 10 \times 10^6$ ESALs Δ PSI-2,0

Tabla XII. Valores a utilizar en un análisis de diseño costo eficiencia

Material	M _R MPa (psi)	a _i	m _i
Concreto asfáltico	2760 (400000)	0.42	-----
Base piedra partida	207 (30000)	0.14	0.80
Sub-base granular	97 (14000)	0.10	0.70
Subrasante	34 (5000)	-----	-----

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

De acuerdo a los módulos resilientes se obtiene:

SN=5,2 pulg.

SN_i=2,8 pulg. para proteger la base

SN_i=3,8 pulg. para proteger la sub-base

$$D_1 = \frac{2.8}{0.42} = 6.7", \cong 7.0"$$

$$SN_T^* = a_T D_T^* = 0.42 \times 7.0 = 2.94.$$

$$D_2 \geq SN_2 - SN_1 = \frac{3.8 - 2.94}{0.14 \times 0.80} = 7.7" \cong 8.0$$

$$SN_2 = a_2 m_2 D_2^* = 0.14 \times 0.80 \times 8.00 = 0.90$$

$$D_3 \geq \frac{SN - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3} = \frac{5.2 - (2.94 + 0.90)}{0.10 \times 0.90} = 19.4'' \cong 20.0$$

$$SN_3^* = a_3 m_3 D_3 = 0.10 \times 0.70 \times 20.00 = 1.40$$

$$SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* = 2.94 + 0.90 + 1.40 = 5.24 \geq 5.20$$

4.3.3. Consideraciones de costo en la selección de espesores de capas

Una vez establecidos los espesores mínimos con base en el criterio de protección de capas, el costo inicial del pavimento debe ser minimizado para prever un diseño alternativo al ya obtenido.

Una aproximación tendiente a reducir el costo de la estructura del pavimento es calcular el costo por unidad de SN para cada capa, en \$/SN o sea costo unitario/ $a_i m_i^*$

Tabla XIII. Análisis de asignación de costos a las variables en el proceso de selección de espesores de capas

Material	Costo unitario	a_i	m_i	\$/SN	SN/\$
Piedra partida	0.40	0.16	0.80	3.13	0.32

Grava	0.32	0.10	0.95	3.37	0.30
Concreto asfáltico	1.50	0.37	1.00	4.05	0.25

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

Usando este criterio se maximizará el espesor del material que provea la mayor contribución estructural por dólar gastado y se minimizará el espesor de menor contribución por dólar gastado. En este caso, la piedra partida provee el mayor número estructural por cada dólar gastado y el concreto asfáltico, el menor.

4.4. Pérdida de serviciabilidad por condiciones ambientales

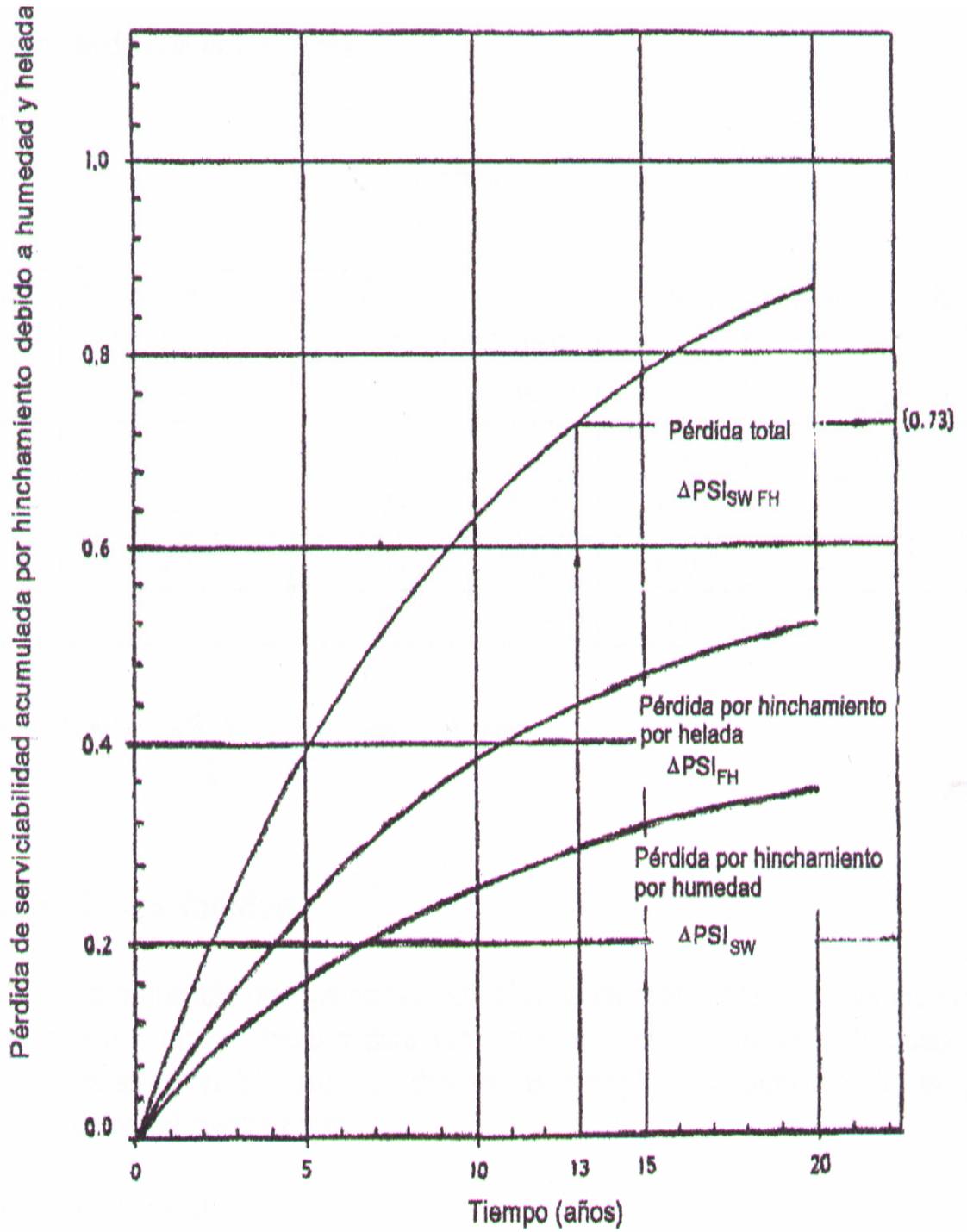
Es para el caso de paquetes estructurales sobre suelos expansivos o sometidos a hinchamiento por helada. Veamos cómo se determina el período de vida útil de un pavimento en estas condiciones:

1) Se selecciona un número estructural apropiado para la estructura inicial del pavimento mediante los procedimientos ya descritos. Como el número estructural tiene muy pequeño efecto en la pérdida de serviciabilidad debido a las causas ambientales, no debe ser mayor que el requerido para condiciones de subrasantes normales. En este caso es $SN = 4.4$ pulg.

2) Se selecciona un período de vida útil que se espera bajo condiciones de expansión o hinchamiento por helada y se lo coloca en la columna 2. Este período debe ser menor que el previsto para condiciones normales.

3) A través del gráfico de pérdida de serviciabilidad por condiciones ambientales (Fig. 4.3) se puede conocer la pérdida de serviciabilidad para los períodos de columna 2 y se los coloca en columna 3.

Figura 18. Pérdida de serviciabilidad por condiciones ambientales



AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

4) Se resta la pérdida de serviciabilidad por condiciones ambientales de la pérdida total de serviciabilidad ($\Delta p=4.4 - 2.5 = 1.9$ en el ejemplo) para establecer la pérdida de serviciabilidad por efecto exclusivamente del tránsito y se coloca en columna 4.

5) Mediante el ábaco de Fig. 4.1 se puede estimar el número de ESALs que corresponde a la pérdida de serviciabilidad de columna 4. Estos valores se colocan en columna 5.

6) Se estima el número de años que corresponde a cada uno de los valores de ESALs de columna 5 y estos valores van a columna 6.

7) Se compara el período de vida útil de columna 2 con el de columna 6. Si la diferencia es mayor que un año, se promedian ambos y se usa este promedio para la próxima iteración. Si la diferencia es menor que un año, se puede afirmar que se ha alcanzado la convergencia. El promedio entre valores correspondientes de columna 2 y 6 es el período de vida útil previsto para ese camino con el número estructural adoptado.

$P_0=4.4$ Máximo período de vida útil 15 años

$\Delta PSI=4.4-2.5=1.9$

Tabla XIV. Comparación de la integración de precios sobre el paquete estructural en suelos expansivos

Iteración Nº	Período de vida útil estimado (años)	Δp por hinchamiento	Δp por tránsito 1.9-(3)	Nº ESALs	Período de vida útil correspondiente (años)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	13.0	0.73	1.17	2.0×10^6	6.3
2	9.7	0.63	1.27	2.3×10^6	7.2
3	8.5	0.56	1.34	2.6×10^6	8.2

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimentos, 2002.

Período de vida útil $\frac{8.5 + 8.2}{2} = 8.3 \text{ años} \cong 8.0 \text{ años}$

4.5. Análisis de sensibilidad

La influencia que tienen las variables de entrada sobre el SN es muy dispar, unas pesan más que otras e incluso para valores altos o bajos, una variable puede tener distintas influencias en el SN. Aquí se dan varios ejemplos haciendo uso del programa DARWin. Los datos del ejemplo son:

W_{18} (Nº de ESALs) = 10×10^6 ; serviciabilidad inicial $p_0 = 4,2$;

Serviciabilidad final $p_t = 2,5$; confiabilidad $R = 90\%$

Desvío estándar de las variables $S_0 = 45$;

Módulo resiliente de la subrasante $MR = 5000 \text{ psi} = 35 \text{ MPa}$

De este análisis resulta un número estructural $SN=143 \text{ Mm. (5.6 \text{ pulg.})}$.

Si se fija una de las variables y se hace variar la otra se puede estudiar su sensibilidad. En la Fig. 4.5 se muestra el efecto del tránsito sobre el SN. Un incremento de ESALs de 5 a 25 millones produce un incremento de SN de 31 mm. (1,24 pulg.). Este incremento es más sustancial a bajos niveles de tránsito. Por ejemplo un incremento de 5 a 10 millones produce un aumento de 13 mm. (0,51 pulg) en el SN, mientras que un incremento entre 20 y 25 millones produce un incremento de 4 mm. (0,17 pulg.) en SN.

4.6. Limitaciones en el método de diseño AASHTO

1) Materiales y subrasantes limitados. El *AASHTO Road Test* fue hecho con una clase típica de materiales y un único tipo de subrasante. La extrapolación de los resultados obtenidos a aplicaciones generales es peligrosa, dado que los materiales y suelos de un determinado lugar pueden ser muy diferentes a los usados en el *AASHTO Road Test*. Este problema se salva con el uso de factores de ajuste, M^a , a , m_i , etc. pero pese a todo, muchos de estos factores están basados en relaciones empíricas y deben usarse con cuidado.

2) Tránsito no mezclado. El *AASHTO Road Test* consideraba el tránsito acumulado de vehículos con cargas y configuraciones por eje idénticos. En la realidad, los pavimentos están expuestos a un gran número de configuraciones y cargas por eje. El proceso para convertir un tránsito mixto en un número equivalente de pasadas de ESALs se basa en una relación empírica no verificada in situ.

3) Períodos de vida útil muy cortos en el *Road Test*. El número de años y las cargas aplicadas en el *AASHTO Road Test* representan sólo una fracción de la vida de diseño y de las aplicaciones de cargas vistas en la realidad. Con períodos muy largos en servicio, el deterioro del pavimento por condiciones ambientales empieza a ser importante.

4) Factores equivalentes de carga. Los factores equivalentes de carga usados para pasar del tránsito mixto al número de ESALs son válidos para los materiales, composición del pavimento, clima y subrasante del *AASHTO Road Test*. La extrapolación de estos factores a otras condiciones es desconocida. Estos factores, a su vez, están dados para niveles finales de serviciabilidad variables entre 2,0 y 2,5. Para caminos muy importantes de alto volumen de tránsito pueden adoptarse serviciabilidades finales mayores y estos LEFs no se adecuan correctamente.

5) Variabilidad. Una de las principales limitaciones del método AASHTO es que está basado en tramos muy cortos de pavimentos con un gran control de calidad en lo que respecta a materiales y construcción. La variabilidad en construcción y materiales en casos reales es mucho mayor. Los proyectos diseñados con valores medios tendrán fallas localizadas antes de que su serviciabilidad descienda a su nivel final, a menos que se use un alto nivel de confiabilidad en el diseño.

6) Falta de guía en el diseño. Los coeficientes estructurales o de capa y los factores de drenaje m_i tienen una gran importancia en la determinación de los espesores de pavimentos, pero se han dado muy pocas guías en este rubro. Lo mismo ocurre con la confiabilidad. La selección de estos valores debe estar basada en el buen juicio y experiencia del proyectista.

4.7 Tendencias futuras en el diseño de pavimentos flexibles

El pavimento flexible es en realidad un sistema elástico multicapa. Hay dos maneras básicas de encarar el diseño de un pavimento. Una de ellos considera un procedimiento general de diseño aplicable a diferentes condiciones de tránsito y clima. Este es un método empírico y simplista. Se basa en la correlación entre el comportamiento observado in situ y mediciones de propiedades de materiales y espesores. El AASHTO es un método de este tipo. El otro tipo de método de diseño está basado en métodos mecánico-empíricos y se fundamentan en la correlación entre la respuesta predicha de un pavimento a través de modelos elásticos o mediante análisis por elementos finitos y las mediciones observadas in situ. Como ejemplo se tiene el método *Shell*.

La AASHTO consideró la posibilidad de implementar un método mecánico-empírico en la guía de diseño AASHTO de 1986, pero finalmente se adoptó un método empírico como los anteriores por la gran aceptación que habían tenido éstos entre los usuarios y por el hecho de que un método mecánico-empírico necesita muchas verificaciones. No obstante, la tendencia es a ir hacia soluciones mecánicas y hacia allí apuntan las investigaciones.

5. DISEÑO ASISTIDO POR UN ORDENADOR

5.1. Diseño asistido por un ordenador, aplicando la norma AASHTO 2002.

1. PERIODO DE DISEÑO

Asumiremos un período de diseño de 15 años durante la vida útil.

2. PARÁMETROS DE DISEÑO

- a) Módulo de resiliencia para carpeta de 400,000 PSI
- b) Base con CBR de 70%
- b) Sub-base con CBR de 30%
- c) Sub-rasante CBR saturado de: 6%
- d) Confiabilidad: 90%
- e) Nivel de servicio inicial: 4.2
- f) Nivel de servicio final: 2.5
- g) Desviación estándar: .44

Nota: No se considerará pérdida de nivel de servicio por hinchamiento.

Se deberá efectuar una iteración suponiendo grueso de carpeta de 7.5 cms. lo que equivale a 2.95".

Se deberá calcular otra opción con base negra en vez de base triturada.

3.- CÁLCULO DE MÓDULO DE RESILIENCIA DE LA SUB-RASANTE

Notas:

**En el mes de agosto la condición de la sub-rasante pasa de seca a húmeda debido a que se inicia la época de canícula a mediados del mes de julio en Guatemala.

**En el mes de noviembre cambia la condición de la sub-rasante de saturada a seca debido a que se inicia la época seca en Guatemala.

Usando la fórmula AASHTO encontramos el módulo de resiliencia de la sub-rasante: $MR = 2,555 \cdot CBR^{0.64}$

De los datos del catadrático tenemos que el CBR de la sub-rasante = 16.5 %
Entonces MR de la sub-rasante es:

$$MR_{sub} = 2,555 \cdot 6^{0.64} = 15,366.70$$

El daño relativo de la sub-rasante para cada quincena lo obtenemos de la ecuación

$$U_j = 1.18 \cdot 10^8 / (MR^{2.32})$$

Quincenas	Condición de la sub-rasante	Factor de variación del módulo de la sub-rasante	Condición de la base	Condición de la sub-base	Módulo de resiliencia de la sub-rasante * Factor de variac. (MRsub)	Daño relativo quincenal (Uj)
					PSI	
Enero	húmeda	1.3	seca	húmeda	19,976.7107	0.01244
Enero	húmeda	1.3	seca	húmeda	19,976.7107	0.01244
Febrero	húmeda	1.3	seca	húmeda	19,976.7107	0.01244
Febrero	húmeda	1.3	seca	húmeda	19,976.7107	0.01244
Marzo	húmeda	1.3	seca	húmeda	19,976.7107	0.01244
Marzo	húmeda	1.3	seca	húmeda	19,976.7107	0.01244
Abril	húmeda	1.3	seca	húmeda	19,976.7107	0.01244
Abril	húmeda	1.3	seca	húmeda	19,976.7107	0.01244
Mayo	húmeda	1.3	seca	húmeda	19,976.7107	0.01244
Mayo	húmeda	1.3	húmeda	húmeda	19,976.7107	0.01244
Junio	saturada	1.3	húmeda	húmeda	19,976.7107	0.01244
Junio	saturada	1.0	húmeda	saturada	15,366.7006	0.02286
Julio	saturada	1.0	húmeda	saturada	15,366.7006	0.02286
Julio	saturada	1.0	húmeda	saturada	15,366.7006	0.02286
Agosto	saturada	1.0	húmeda	saturada	15,366.7006	0.02286
Agosto	saturada	1.0	húmeda	saturada	15,366.7006	0.02286
Septiembre	saturada	1.0	saturada	saturada	15,366.7006	0.02286
Septiembre	saturada	1.0	saturada	saturada	15,366.7006	0.02286
Octubre	saturada	1.0	saturada	saturada	15,366.7006	0.02286
Octubre	húmeda	1.3	húmeda	húmeda	19,976.7107	0.01244
Noviembre	húmeda	1.3	húmeda	húmeda	19,976.7107	0.01244
Noviembre	húmeda	1.3	húmeda	húmeda	19,976.7107	0.01244
Diciembre	húmeda	1.3	seca	húmeda	19,976.7107	0.01244
Diciembre	húmeda	1.3	seca	húmeda	19,976.7107	0.01244
SUMATORIA DE Uj =						0.38182

Tomando periodos quincenales el ño relativo promedio Uj = **0.0159093**

Tabla XVIII. Valores de θ capa de base condición húmeda

Espesor de carpeta	Módulo resiliente de la sub rasante			
	3000	7500	15000	17,546.85
<2"	48,273	55,189	61,569	
2-4	31,849	40,620	48,273	49,290
4-6	21,012	31,849	40,620	
>6	21,012	21,012	21,012	

Módulo de resiliencia base CBR=100, condición húmeda

Tabla XIX. Valores de θ capa de base condición saturada

Espesor de carpeta	Módulo resiliente de la sub rasante			
	3000	7500	15000	17,546.85
<2"	24,137	27,595	30,785	
2-4	15,924	20,310	24,137	24,645
4-6	10,506	15,924	20,310	
>6	10,506	10,506	10,506	

Módulo de resiliencia base CBR=100

Tabla XX. Valores de θ capa de base condición seca

Espesor de carpeta	Módulo resiliente de la sub rasante			
	3000	7500	15000	17,546.85
<2"	19,309	22,076	24,628	
2-4	12,739	16,248	19,309	19,716
4-6	8,405	12,739	16,248	
>6	8,405	8,405	8,405	

Coefficiente estructural a_2 BASE CBR=100

Tabla XXI. Valores de θ capa de base condición húmeda+A195

Espesor de carpeta	Módulo resiliente de la sub rasante			
	3000	7500	15000	17,546.85
<2"	0.074	0.080	0.085	
2-4	0.057	0.067	0.074	0.075
4-6	0.039	0.057	0.067	
>6	0.039	0.039	0.039	

Coefficiente estructural a_2 BASE CBR=100

Tabla XXII. Valores de θ capa de base condición saturada

Espesor de carpeta	Módulo resiliente de la sub rasante			
	3000	7500	15000	17,546.85
<2"	0.045	0.051	0.055	
2-4	0.027	0.038	0.045	0.046
4-6	0.010	0.027	0.038	
>6	0.010	0.010	0.010	

Coefficiente estructural a_2 base CBR=100

Tabla XXIII. Valores de θ capa de base condición seca

Espesor de carpeta	Modulo resiliente de la sub rasante			
	3000	7500	15000	17,546.85
<2"	0.035	0.041	0.046	
2-4	0.018	0.028	0.035	0.036
4-6	0.000	0.018	0.028	
>6	0.000	0.000	0.000	

Valores característicos capa sub base CBR=30

Valores de θ capa de sub base

Espesor carpeta	θ
<2"	10
2-4	7.5
>4	5

$$\text{MR sub base} = k_1 \cdot \theta^{0.6}$$

K_1 Condición húmeda 5,400

K_1 Condición saturada 4,600

Tabla XXIV. Valores de θ capa de sub base condición húmeda

Espesor de carpeta	Módulo de resiliencia sub base CBR=30, condición húmeda
<2"	21497.79
2-4	18089.66
>4	14183.25

Tabla XXV. Valores de θ capa de sub base condición saturada

Espesor de carpeta	Módulo de resiliencia sub base CBR=30, condición saturada
<2"	18312.93
2-4	15409.71
>4	12082.03

Tabla XXVI. Valores de θ capa de sub base condición húmeda

Espesor de carpeta	Coefficiente estructural sub base CBR=30 condición húmeda
<2"	0.06
2-4	0.05
>4	0.04

Tabla XXVII. Valores de θ capa de sub base condición saturada

Espesor de carpeta	Coefficiente estructural sub base CBR=30 condición saturada
<2"	0.05
2-4	0.04
>4	0.03

**5.- Cálculo promedio quincenal de módulos de resiliencia
coeficientes estructurales de base y sub base**

No. de periodo (quincenas)	Quincenas	Base CBR 100%			Sub base CBR DE 30%		
		Condición de la base triturada	Módulo de resiliencia de la base	Coficiente estructural de la base a2	Módulo de resiliencia de la sub base	Módulo de resiliencia de la base	Coficiente estructural de la sub- base a3
1	Enero	seca	49,290	0.075	húmeda	18,089.66	0.05061
2	Enero	seca	49,290	0.075	húmeda	18,089.66	0.05061
3	Febrero	seca	49,290	0.075	húmeda	18,089.66	0.05061
4	Febrero	seca	49,290	0.075	húmeda	18,089.66	0.05061
5	Marzo	seca	49,290	0.075	húmeda	18,089.66	0.05061
6	Marzo	seca	49,290	0.075	húmeda	18,089.66	0.05061
7	Abril	seca	49,290	0.075	húmeda	18,089.66	0.05061
8	Abril	seca	49,290	0.075	húmeda	18,089.66	0.05061
9	Mayo	seca	49,290	0.046	húmeda	18,089.66	0.05061
10	Mayo	húmeda	24,645	0.046	húmeda	18,089.66	0.05061
11	Junio	húmeda	24,645	0.046	húmeda	18,089.66	0.05061
12	Junio	húmeda	24,645	0.046	saturada	15,409.71	0.04439
13	Julio	húmeda	24,645	0.046	saturada	15,409.71	0.04439
14	Julio	húmeda	24,645	0.046	saturada	15,409.71	0.04439
15	Agosto	húmeda	24,645	0.046	saturada	15,409.71	0.04439
16	Agosto	húmeda	24,645	0.046	saturada	15,409.71	0.04439
17	Septiembre	saturada	19,716	0.036	saturada	15,409.71	0.04439
18	Septiembre	saturada	19,716	0.036	saturada	15,409.71	0.04439
19	Octubre	saturada	19,716	0.036	saturada	15,409.71	0.04439
20	Octubre	húmeda	24,645	0.036	húmeda	18,089.66	0.05061
21	Noviembre	húmeda	24,645	0.046	húmeda	18,089.66	0.05061
22	Noviembre	húmeda	24,645	0.046	húmeda	18,089.66	0.05061
23	Diciembre	seca	49,290	0.036	húmeda	18,089.66	0.05061
24	Diciembre	seca	49,290	0.036	húmeda	18,089.66	0.05061

Promedios

35,324 0.05325

17,196.3480 0.04854

Factor de corrección de la base de CBR 100% a CBR 70%

Para CBR de 70% (de gráfica) = 0.86
MRBase ajustado = 30,378.99740
Coef. estructural ajustado (a2)= 0.055 ← $a2=0.098 \cdot \text{Log}(\text{Mrbase})-0.3846$

Factor de corrección de la sub-base de CBR 30% a CBR 30%

Para CBR de 30% (de tabla) = 1
MRsub-base ajustado = 17,196.35 18,572.0558
Coef. estructural ajustado (a3)= 0.04865 ← $a3=0.0894 \cdot \text{Log}(\text{MRsub-base})-0.33$

6. Cálculo del número máximo estructural (NS) según las especificaciones de diseño

Resolución del SN Pavimento

$W_{18} := 9864805$ $S_0 := 0.44$ $\Delta PSI := 4.2 - 2.25$
 $M_b := 30373.01$ $Z_r := -1.282$

SN := 1

Given

$$\log(W_{18}) = Z_r \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log(M_b) - 8.07$$

Find(SN) = 2.90233

Resolución del SN Base

$M_{sb} := 17196.35$

SN₂ := 1

Given

$$\log(W_{18}) = Z_r \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log(SN_2 + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN_2 + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log(M_{sb}) - 8.07$$

Find(SN₂) = 3.5692

Resolución del SN Sub-base

$M_{sr} := 17546.85$

SN₃ := 1

Given

$$\log(W_{18}) = Z_r \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log(SN_3 + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN_3 + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log(M_{sr}) - 8.07$$

Find(SN₃) = 3.54351

7. Cálculo de espesores

Capa estructural	Número estructural NS	Coefficiente estructural a	Espesor de capa D	Espesor de capa propuesto	Número estructural proveído NS
Pavimento	2.90200	0.1650	17.58788	10.00	1.65
Base	3.56900	0.0547	35.08727	10.00	0.55
Sub base	3.54400	0.0486	27.69031	30.00	1.46
				50.00	3.656362

NS= 3.65636192 >= 3.54

Debido al exagerado espesor de la capa de asfalto, se mejorará la sub base, colocando base negra.

Capa estructural	Número estructural NS	Coefficiente estructural a	Espesor de capa D	Espesor de capa propuesto	Numero estructural proveído NS
Pavimento	1.15900	0.1650	7.02424	10.00	1.65
Base	3.56900	0.11000	17.44545	10.00	1.10
Sub base	3.54400	0.04865	16.32133	17.00	0.83
				37.00	3.57702

NS= 3.57701597 >= 3.54

Base negra

MR=300,000

a=0.11

m=1.0

Resolución del SN Pavimento

$W_{18} := 9864805$

$S_0 := 0.44$

$\Delta PSI := 4.2 - 2.25$

$M_b := 300000$

$Z_r := -1.282$

SN := 1

Given

$$\log(W_{18}) = Z_r \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log(M_b) - 8.07$$

Find(SN) = 1.15874

Capa estructural	Número estructural NS	Coefficiente estructural a	Espesor de capa D	Espesor de capa propuesto	Número estructural proveído NS
Pavimento	1.15900	0.1650	7.02424	10.00	1.65
Base	3.56900	0.11000	17.44545	10.00	1.10
Sub base	3.54400	0.04865	16.32133	17.00	0.83
				37.00	3.57702

NS= 3.57701597 >= 3.54

Base estabilizada con cemento

MR=661,000

a=0.067

m=1.0

Capa estructural	Número estructural NS	Coefficiente estructural a	Espesor de capa D	Espesor de capa propuesto	Número estructural proveído NS
Pavimento	0.77300	0.165	4.68485	10.00	1.65
Base	3.56900	0.06700	28.64	16.00	1.07
Sub base	3.54400	0.04865	16.89689	17.00	0.83
				43.00	3.55

NS= 3.55 >= 3.54

Módulo efectivo de resiliencia de la sub-rasante:

$$MR_{subras} = (1.18 \cdot 10^8 / U_j)^{1/2.32} =$$

17,546.85

4. Efecto de la humedad en el módulo de resiliencia y coeficiente estructural

Capa de pavimento a 20 grados centígrados (68 grados Fahrenheit)

Tabla XVI. Variación coeficiente estructural del concreto asfáltico

MR A 20° C	a ₁
100,000	0.073
200,000	0.118
300,000	0.145
400,000	0.165
450,000	0.173
500,000	0.182

Capa de base triturada CBR = 100

Tabla XVII. Valores de θ capa de base condición seca

Espesor de carpeta	Módulo resiliente de la subrasante			
	3000	7500	15000	17,546.85
<2"	20	25	30	
2-4	10	15	20	20.71
4-6	5	10	15	
>6	5	5	5	

$$MR_{BASE} = k_1 \cdot \theta^{0.6}$$

K₁ Condición seca 8,000

K₁ Condición húmeda 4,000

K₁ Condición saturada 3,200

Módulo de resiliencia base CBR=100, condición seca

ANEXOS

TABLA XXVII
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles,
ejes tándem, Pt = 2, 0

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.000 0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0003	0.000 3	0.000	3 0.0002	0.0002	0.0002
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002
10	0.007	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006
12	0.013	0.016	0.016	0.014	0.013	0.012
14	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
16	0.041	0.048	0.050	0.046	0.042	0.040
18	0.066	0.077	0.081	0.075	0.069	0.066
20	0.103	0.117	0.124	0.117	0.109	0.105

22	0.156	0.171	0.183	0.174	0.164	0.158
24	0.227	0.244	0.260	0.252	0.239	0.231
26	0.322	0.340	0.360	0.353	0.338	0.329
28	0.447	0.465	0.487	0.481	0.466	0.455
30	0.607	0.623	0.646	0.643	0.627	0.617
32	0.810	0.823	0.843	0.842	0.829	0.819
34	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.07
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.76	1.75	1.73	1.72	1.73	1.74
40	2.22	2.19	2.15	2.13	2.16	2.18
42	2.77	2.73	2.64	2.62	2.66	2.70
44	3.42	3.36	3.23	3.18	3.24	3.31
46	4.20	4.11	3.92	3.83	3.91	4.02
48	5.10	4.98	4.72	4.58	4.68	4.83
50	6.15	5.99	5.64	5.44	5.56	5.77
52	7.37	7.16	6.71	6.43	6.56	6.83
54	8.77	8.51	7.93	7.55	7.69	8.03
56	10.4	10.1	9.3	8.8	9.0	9.4
58	12.2	11.8	10.9	10.3	10.4	10.9
60	14.3	13.8	12.7	11.9	12.0	12.6
62	16.6	16.0	14.7	13.7	13.8	14.5
64	19.3	18.6	17.0	15.8	15.8	16.6
66	22.2	21.4	19.6	18.0	18.0	18.9
68	25.5	24.6	22.4	20.6	20.5	21.5
70	29.2	28.1	25.6	23.4	23.2	24.3
72	33.3	32.0	29.1	26.5	26.2	27.4
74	37.8	36.4	33.0	30.0	29.4	30.8
76	42.8	41.2	37.3	33.8	33.1	34.5
78	48.4	46.5	42.0	38.0	37.0	38.6
80	54.4	52.3	47.2	42.5	41.3	43.0
82	61.1	58.7	52.9	47.6	46.0	47.8
84	68.4	65.7	59.2	53.0	51.2	53.0
86	76.3	73.3	66.0	59.0	56.8	58.6
88	85.0	81.6	73.4	65.5	62.8	64.7
90	94.4	90.6	81.5	72.6	69.4	71.3

Tabla XXVIII
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes
tándem, Pt = 2, 0

Carga	Número estructural
-------	--------------------

p/eje (kips) ⁶	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
8	0.0009	0.0010	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007
10	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001
12	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
14	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005
16	0.010	0.012	0.012	0.010	0.009	0.009
18	0.016	0.019	0.019	0.017	0.015	0.015
20	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
22	0.034	0.042	0.042	0.038	0.035	0.034
24	0.049	0.058	0.060	0.055	0.051	0.048
26	0.068	0.080	0.083	0.077	0.071	0.068
28	0.093	0.107	0.113	0.105	0.098	0.094
30	0.125	0.140	0.149	0.140	0.131	0.126
32	0.164	0.182	0.194	0.184	0.173	0.167
34	0.213	0.233	0.248	0.238	0.225	0.217
36	0.273	0.294	0.313	0.303	0.288	0.279
38	0.346	0.368	0.390	0.381	0.364	0.353
40	0.434	0.456	0.481	0.473	0.454	0.443
42	0.538	0.560	0.587	0.580	0.561	0.548
44	0.662	0.682	0.710	0.705	0.686	0.673
46	0.807	0.825	0.852	0.849	0.831	0.818
48	0.976	0.992	1.015	1.014	0.999	0.987
50	1.17	1.18	1.20	1.20	1.19	1.18
52	1.40	1.40	1.42	1.42	1.41	1.40
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.95	1.93	1.93	1.94	1.94
58	2.29	2.27	2.24	2.23	2.25	2.27
60	2.67	2.64	2.59	2.57	2.60	2.63
62	3.10	3.05	2.98	2.95	2.99	3.04
64	3.59	3.53	3.41	3.37	3.42	3.49
66	4.13	4.05	3.89	3.83	3.90	3.99
68	4.73	4.63	4.43	4.34	4.42	4.54
70	5.40	5.28	5.03	4.90	5.00	5.15
72	6.15	6.00	5.68	5.52	5.63	5.82
74	6.97	6.79	6.41	6.20	6.33	6.56
76	7.88	7.67	7.21	6.94	7.08	7.36
78	8.88	8.63	8.09	7.75	7.90	8.23
80	9.98	9.69	9.05	8.63	8.79	9.18
82	11.2	10.8	10.1	9.6	9.8	10.2

12	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
14	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005
16	0.010	0.012	0.012	0.010	0.009	0.009
18	0.016	0.019	0.019	0.017	0.015	0.015
20	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
22	0.034	0.042	0.042	0.038	0.035	0.034
24	0.049	0.058	0.060	0.055	0.051	0.048
26	0.068	0.080	0.083	0.077	0.071	0.068
28	0.093	0.107	0.113	0.105	0.098	0.094
30	0.125	0.140	0.149	0.140	0.131	0.126
32	0.164	0.182	0.194	0.184	0.173	0.167
34	0.213	0.233	0.248	0.238	0.225	0.217
36	0.273	0.294	0.313	0.303	0.288	0.279
38	0.346	0.368	0.390	0.381	0.364	0.353
40	0.434	0.456	0.481	0.473	0.454	0.443
42	0.538	0.560	0.587	0.580	0.561	0.548
44	0.662	0.682	0.710	0.705	0.686	0.673
46	0.807	0.825	0.852	0.849	0.831	0.818
48	0.976	0.992	1.015	1.014	0.999	0.987
50	1.17	1.18	1.20	1.20	1.19	1.18
52	1.40	1.40	1.42	1.42	1.41	1.40
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.95	1.93	1.93	1.94	1.94
58	2.29	2.27	2.24	2.23	2.25	2.27
60	2.67	2.64	2.59	2.57	2.60	2.63
62	3.10	3.05	2.98	2.95	2.99	3.04
64	3.59	3.53	3.41	3.37	3.42	3.49
66	4.13	4.05	3.89	3.83	3.90	3.99
68	4.73	4.63	4.43	4.34	4.42	4.54
70	5.40	5.28	5.03	4.90	5.00	5.15
72	6.15	6.00	5.68	5.52	5.63	5.82
74	6.97	6.79	6.41	6.20	6.33	6.56
76	7.88	7.67	7.21	6.94	7.08	7.36
78	8.88	8.63	8.09	7.75	7.90	8.23
80	9.98	9.69	9.05	8.63	8.79	9.18
82	11.2	10.8	10.1	9.6	9.8	10.2
84	12.5	12.1	11.2	10.6	10.8	11.3
86	13.9	13.5	12.5	11.8	11.9	12.5
88	15.5	15.0	13.8	13.0	13.2	13.8
90	17.2	16.6	15.3	14.3	14.5	15.2

Tabla XXX

**Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes
tándem,
Pt = 2,5**

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.003	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002
6	0.011	0.017	0.017	0.013	0.010	0.009
8	0.032	0.047	0.051	0.041	0.034	0.031
10	0.078	0.102	0.118	0.102	0.088	0.080
12	0.168	0.198	0.229	0.213	0.189	0.176
14	0.328	0.358	0.399	0.388	0.360	0.342
16	0.591	0.613	0.646	0.645	0.623	0.606
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.57	1.49	1.47	1.51	1.55
22	2.48	2.38	2.17	2.09	2.18	2.30
24	3.69	3.49	3.09	2.89	3.03	3.27
26	5.33	4.99	4.31	3.91	4.09	4.48
28	7.49	6.98	5.90	5.21	5.39	5.98
30	10.3	9.5	7.9	6.8	7.0	7.8
32	13.9	12.8	10.5	8.8	8.9	10.0
34	18.4	16.9	13.7	11.3	11.2	12.5
36	24.0	22.0	17.7	14.4	13.9	15.5
38	30.9	28.3	22.6	18.1	17.2	19.0
40	39.3	35.9	28.5	22.5	21.1	23.0
42	49.3	45.0	35.6	27.8	25.6	27.7
44	61.3	55.9	44.0	34.0	31.0	33.1
46	75.5	68.8	54.0	41.4	37.2	39.3
48	92.2	83.9	65.7	50.1	44.5	46.5
50	112.00	102.00	79.00	60.00	53.00	55.00

Tabla XXXI
**Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes
tándem,**

Pt = 2,5

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0005	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003	0.0002
6	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
8	0.004	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003
10	0.008	0.013	0.011	0.009	0.007	0.006
12	0.015	0.024	0.023	0.018	0.014	0.013
14	0.026	0.041	0.042	0.033	0.027	0.024
16	0.044	0.065	0.070	0.057	0.047	0.043
18	0.070	0.097	0.109	0.092	0.077	0.070
20	0.107	0.141	0.162	0.141	0.121	0.110
22	0.160	0.198	0.229	0.207	0.180	0.166
24	0.231	0.273	0.315	0.292	0.260	0.242
26	0.327	0.370	0.420	0.401	0.364	0.342
28	0.451	0.493	0.548	0.534	0.495	0.470
30	0.611	0.648	0.703	0.695	0.658	0.633
32	0.813	0.843	0.889	0.887	0.857	0.834
34	1.06	1.08	1.11	1.11	1.109	1.08
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.75	1.73	1.69	1.68	1.70	1.73
40	2.21	2.16	2.06	2.03	2.08	2.14
42	2.76	2.67	2.49	2.43	2.51	2.61
44	3.41	3.27	2.99	2.88	3.00	3.16
46	4.18	3.98	3.58	3.40	3.55	3.79
48	5.08	4.80	4.25	3.98	4.17	4.49
50	6.12	5.76	5.03	4.64	4.86	5.28
52	7.33	6.87	5.93	5.38	5.63	6.17
54	8.72	8.14	6.95	6.22	6.47	7.15
56	10.3	9.6	8.1	7.2	7.4	8.2
58	12.1	11.3	9.4	8.2	8.4	9.4
60	14.2	13.1	10.9	9.4	9.6	10.7
62	16.5	15.3	12.6	10.7	10.8	12.1
64	19.1	17.6	14.5	12.2	12.2	13.7
66	22.1	20.3	16.6	13.8	13.7	15.4
68	26.3	23.3	18.9	15.6	15.4	17.2
70	29.0	26.6	21.5	17.6	17.2	19.2
72	33.0	30.3	24.4	19.8	19.2	21.3
74	37.5	34.4	27.6	22.2	21.3	23.6

76	42.5	38.9	31.1	24.8	23.7	26.1
78	48.0	43.9	35.0	27.8	26.2	28.8
80	54.0	49.4	39.2	30.9	29.0	31.7
82	60.6	55.4	43.9	34.4	32.0	34.8
84	67.8	61.9	49.0	38.2	35.3	38.1
86	75.7	69.1	54.5	42.3	38.8	41.7
88	84.3	76.9	60.6	46.8	42.6	45.6
90	93.7	85.4	67.1	51.7	46.8	49.7

Tabla XXXII
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes
tándem,
Pt = 2,5

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0006	0.0007	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003
8	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
10	0.003	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002
12	0.005	0.007	0.006	0.004	0.003	0.003
14	0.008	0.012	0.010	0.008	0.006	0.006
16	0.012	0.019	0.018	0.013	0.011	0.010
18	0.018	0.029	0.028	0.021	0.017	0.016
20	0.027	0.042	0.042	0.032	0.027	0.024
22	0.038	0.058	0.060	0.048	0.040	0.036
24	0.053	0.078	0.084	0.068	0.057	0.051
26	0.072	0.103	0.114	0.095	0.080	0.072
28	0.098	0.133	0.151	0.128	0.109	0.099
30	0.129	0.169	0.195	0.170	0.145	0.133
32	0.169	0.213	0.247	0.220	0.191	0.175
34	0.219	0.266	0.308	0.281	0.246	0.228
36	0.279	0.329	0.379	0.352	0.313	0.292
38	0.352	0.403	0.461	0.436	0.393	0.368
40	0.439	0.491	0.554	0.533	0.487	0.459
42	0.543	0.594	0.661	0.644	0.597	0.567
44	0.666	0.714	0.781	0.769	0.723	0.692

46	0.811	0.854	0.918	0.911	0.868	0.838
48	0.979	1.015	1.072	1.069	1.033	1.005
50	1.17	1.20	1.24	1.25	1.22	1.20
52	1.40	1.41	1.44	1.44	1.43	1.41
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.93	1.90	1.90	1.91	1.93
58	2.29	2.25	2.17	2.16	2.20	2.24
60	2.67	2.60	2.48	2.44	2.51	2.58
62	3.09	3.00	2.82	2.76	2.85	2.95
64	3.57	3.44	3.19	3.10	3.22	3.36
66	4.11	3.94	3.61	3.47	3.62	3.81
68	4.71	4.49	4.06	3.88	4.05	4.30
70	5.38	5.11	4.57	4.32	4.52	4.84
72	6.12	5.79	5.13	4.80	5.03	5.41
74	6.93	6.54	5.74	5.32	5.57	6.04
76	7.84	7.37	6.41	5.88	6.15	6.71
78	8.83	8.28	7.14	6.49	6.78	7.43
80	9.92	9.28	7.95	7.15	7.45	8.21
82	11.1	10.4	8.8	7.9	8.2	9.0
84	12.4	11.6	9.8	8.6	8.9	9.9
86	13.8	12.9	10.8	9.5	9.8	10.9
88	15.4	14.3	11.9	10.4	10.6	11.9

Tabla XXXIII
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes
tándem,
Pt = 3.0

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0008	0.0009	0.0006	0.0003	0.0002	0.0002
4	0.004	0.008	0.006	0.004	0.002	0.002
6	0.014	0.030	0.028	0.018	0.012	0.010
8	0.035	0.070	0.080	0.055	0.040	0.034
10	0.082	0.132	0.168	0.132	0.101	0.086
12	0.173	0.231	0.296	0.260	0.212	0.187
14	0.332	0.388	0.468	0.447	0.391	0.358
16	0.594	0.633	0.695	0.693	0.651	0.622
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.60	1.53	1.41	1.38	1.44	1.51

22	2.47	2.29	1.96	1.83	1.97	2.16
24	3.67	3.33	2.69	2.39	2.60	2.96
26	5.29	4.72	3.65	3.08	3.33	3.91
28	7.43	6.56	4.88	3.93	4.17	5.00
30	10.2	8.9	6.5	5.0	5.1	6.3
32	13.8	12.0	8.4	6.2	6.3	7.7
34	18.2	15.7	10.9	7.8	7.6	9.3
36	23.8	20.4	14.0	9.7	9.1	11.0
38	30.6	26.2	17.7	11.9	11.0	13.0
40	38.8	33.2	22.2	14.6	13.1	15.3
42	48.8	41.6	27.6	17.8	15.5	17.8
44	60.6	51.6	34.0	21.6	18.4	20.6
46	74.7	63.4	41.5	26.1	21.6	23.8
48	91.2	77.3	50.3	31.3	25.4	27.4
50.00	110.00	94.00	61.00	37.00	30.00	32.00

Tabla XXXIV
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem,
Pt = 3.0

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
4	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
6	0.003	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001
8	0.006	0.011	0.009	0.005	0.003	0.003
10	0.011	0.024	0.020	0.012	0.008	0.007
12	0.019	0.042	0.039	0.024	0.017	0.014
14	0.031	0.066	0.068	0.045	0.032	0.026
16	0.049	0.096	0.109	0.076	0.055	0.046
18	0.075	0.134	0.164	0.121	0.090	0.076
20	0.113	0.181	0.232	0.182	0.139	0.119
22	0.166	0.241	0.313	0.260	0.205	0.178
24	0.238	0.317	0.407	0.358	0.292	0.257
26	0.333	0.413	0.517	0.476	0.402	0.360
28	0.457	0.534	0.643	0.614	0.538	0.492
30	0.616	0.684	0.788	0.773	0.702	0.656
32	0.817	0.870	0.956	0.953	0.896	0.855
34	1.07	1.10	1.15	1.15	1.12	1.09

36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.75	1.71	1.64	1.62	1.66	1.70
40	2.21	2.11	1.94	1.89	1.98	2.08
42	2.75	2.59	2.29	2.19	2.33	2.50
44	3.39	3.15	2.70	2.52	2.71	2.97
46	4.15	3.81	3.16	2.89	3.13	3.50
48	5.04	4.58	3.70	3.29	3.57	4.07
50	6.08	5.47	4.31	3.74	4.05	4.70
52	7.27	6.49	5.01	4.24	4.57	5.37
54	8.65	7.67	5.81	4.79	5.13	6.10
56	10.2	9.0	6.7	5.4	5.7	6.9
58	12.0	10.6	7.7	6.1	6.4	7.7
60	14.1	12.3	8.9	6.8	7.1	9.8
62	16.3	14.2	10.2	7.7	7.8	9.5
64	18.9	16.4	11.6	8.6	8.6	10.5
66	21.8	18.9	13.2	9.6	9.5	11.6
68	25.1	21.7	15.0	10.7	10.5	12.7
70	28.7	24.7	17.0	12.0	11.5	13.9
72	32.7	28.1	19.2	13.3	12.6	15.2
74	37.2	31.9	21.6	14.8	13.8	16.5
76	42.1	36.0	24.3	16.4	15.1	17.9
78	47.5	40.6	27.3	18.2	16.5	19.4
80	53.4	45.7	30.5	20.1	18.0	21.0
82	60.0	51.2	34.0	22.2	19.6	22.7
84	67.1	57.2	37.9	24.6	21.3	24.5
86	74.9	63.8	42.1	27.1	23.2	26.4
88	83.4	71.0	46.7	29.8	25.2	28.4
90	92.7	78.8	51.7	32.7	27.4	30.5

Tabla XXXIV
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem,
Pt = 3.0

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0005	0.0004	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
8	0.003	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001
10	0.005	0.008	0.005	0.003	0.002	0.002
12	0.007	0.014	0.010	0.006	0.004	0.003

14	0.011	0.023	0.018	0.011	0.007	0.006
16	0.016	0.035	0.030	0.018	0.013	0.010
18	0.022	0.050	0.047	0.029	0.020	0.017
20	0.031	0.069	0.069	0.044	0.031	0.026
22	0.043	0.090	0.097	0.065	0.046	0.039
24	0.059	0.116	0.132	0.092	0.066	0.056
26	0.079	0.145	0.174	0.126	0.092	0.078
28	0.104	0.179	0.223	0.168	0.126	0.107
30	0.136	0.218	0.279	0.219	0.167	0.143
32	0.176	0.265	0.342	0.279	0.218	0.188
34	0.226	0.319	0.413	0.350	0.279	0.243
36	0.286	0.382	0.491	0.432	0.352	0.310
38	0.359	0.456	0.577	0.524	0.437	0.389
40	0.447	0.543	0.671	0.626	0.536	0.483
42	0.550	0.643	0.775	0.740	0.649	0.593
44	0.673	0.760	0.889	0.865	0.777	0.720
46	0.817	0.894	1.014	1.001	0.920	0.865
48	0.984	1.048	1.152	1.148	1.080	1.030
50	1.18	1.23	1.3	1.31	1.26	1.22
52	1.40	1.43	1.47	1.48	1.45	1.43
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.92	1.86	1.85	1.88	1.91
58	2.28	2.21	2.09	2.06	2.13	2.20
60	2.66	2.54	2.34	2.28	2.39	2.50
62	3.08	2.92	2.61	2.52	2.66	2.84
64	3.56	3.33	2.92	2.77	2.96	3.19
66	4.09	3.79	3.25	3.04	3.27	3.58
68	4.68	4.31	3.62	3.33	3.60	4.00
70	5.34	4.88	4.02	3.64	3.94	4.44
72	6.08	5.51	4.46	3.97	4.31	4.91
74	6.89	6.21	4.94	4.32	4.69	5.40
76	7.78	6.98	5.47	4.70	5.09	5.93
78	8.76	7.83	6.04	5.11	5.51	6.48
80	9.84	8.75	6.67	5.54	5.96	7.06
82	11.0	9.8	7.4	6.0	6.4	7.7
84	12.3	10.9	8.1	6.5	6.9	8.3
86	13.7	12.1	8.9	7.0	7.4	9.0
88	15.3	13.4	9.8	7.6	8.0	9.6
90	16.9	14.8	10.7	8.2	8.5	10.4

