

COMISION DE DISEÑO Y EVALUACION DE PAVIMENTOS

INFORME N° 1

**ALGUNAS RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE
PAVIMENTOS EN CHILE SEGUN AASHTO**

625.8
CCHC
C172
cl

DICIEMBRE DE 1996

**Cámara Chilena de la Construcción
Corporación de Investigación de la Construcción**

Integrantes de la Comisión:

- **Roberto ALVAREZ W., LEN & Asociados Ingenieros Consultores**
- **Blas BARROS T., Asesor del Ministro de Obras Públicas**
- **Juan Pablo COVARRUBIAS T., Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón**
- **Hernán DE SOLMINIHAC T., Pontificia Universidad Católica de Chile**
- **Martín DOMINGUEZ V., Ministerio de Vivienda y Urbanismo**
- **Dusan DUJISIN Q., DDQ Ingenieros Consultores**
- **Gerardo ECHEVERRIA G., INTRAT Ingenieros Consultores**
- **Eugenio GALVEZ G., Ministerio de Obras Públicas**
- **Iván NAVARRO M., ASISTECSA Ingenieros Consultores**
- **Mauricio POBLETE R., MP Ingenieros Consultores**
- **Edmundo PULIDO S., Cámara Chilena de la Construcción**
- **Joel PRIETO V., SERVIU Metropolitano**
- **Ricardo SALSILLI M., Universidad de Chile**

Secretaría Ejecutiva

Corporación de Investigación de la Construcción

Alberto URETA A.

Juan Carlos LEON F.

**CAMARA CHILENA DE
LA CONSTRUCCION
Centro Documentación**

INDICE

	N°
I. INTRODUCCION	1
II. EL METODO AASHTO	4
2.1 Elección	4
2.2 Ecuaciones Básicas del Método	5
2.3 Parámetros	6
2.3.1 Tránsito	7
2.3.2 Confiabilidad	7
2.3.3 Serviciabilidad	9
2.3.4 Módulo Resiliente	12
2.3.5 Módulo de Reacción de la Subrasante (K)	13
2.3.6 Estructuración	15
2.3.7 Drenaje	17
2.3.8 Propiedades del Hormigón	24
2.3.9 Coeficiente de Transferencia de Cargas (J)	25
III. DIAGNOSTICO DEL USO DEL METODO AASHTO EN CHILE	27
IV. CONCLUSIONES	29
V. ESTUDIOS ESPECIALES	34
VI. BIBLIOGRAFIA	35

ANEXOS

ANEXO 1: CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

ANEXO 2: EFECTO DEL INDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL " p_i " EN LA DURABILIDAD DEL PAVIMENTO

ANEXO 3: DETERMINACION DEL VALOR DEL MODULO DE RESILIENCIA DEL SUELO PARA SER USADO EN EL METODO AASHTO-1993

ANEXO 4: USO DEL CONO DE PENETRACION DINAMICO.

I. INTRODUCCION

El método de diseño AASHTO [AASHTO, 1993], originalmente conocido como AASHO, fue desarrollado en los Estados Unidos en la década de los 60, basándose en un ensayo a escala real realizado durante 2 años en el Estado de Illinois. A partir de los deterioros que experimentaron pistas de prueba solicitadas por cargas conocidas, se establecieron ecuaciones que permitieron representar las relaciones deterioro - sollicitación para todas las condiciones ensayadas.

Una limitante de este método, como todo estudio empírico, está en establecer la validez de las relaciones propuestas para condiciones diferentes a las existentes en el lugar de la prueba, situación que debe ser considerada por los diseñadores al momento de aplicarlo a las condiciones locales.

En los últimos años, se han desarrollado una serie de modelos matemáticos, conocidos como "mecanicistas", que procuran representar los comportamientos de los pavimentos. Sin embargo, por diferentes factores y consideraciones, estos procedimientos no han tenido una aceptación unánime, por lo que se usan normalmente como complemento de métodos empíricos.

A partir de la versión del año 1986, el método de diseño AASHTO comenzó a introducir conceptos mecanicistas para adecuar algunos parámetros a condiciones diferentes a las que imperaron en el lugar del ensayo original. Los modelos matemáticos respectivos también requieren de una calibración para las condiciones locales del área donde se pretenden aplicar.

En conformidad con lo señalado, resulta de la mayor importancia calibrar los diferentes parámetros que intervienen en las relaciones incluidas en el método AASHTO, como una forma de obtener diseños confiables y representativos de las condiciones locales.

Dada esta necesidad, la Cámara Chilena de la Construcción, a través de la Corporación de Investigación de la Construcción creó la "Comisión de Diseño y Evaluación de Pavimentos", en adelante la Comisión. En ella participan profesionales de los Ministerios de Obras Públicas, de Vivienda y Urbanismo, de las principales Empresas Consultoras, Instituciones Técnicas de la industria vial chilena, de la Universidad de Chile y de la Pontificia Universidad Católica de Chile. La Comisión mediante el análisis de estudios previos disponibles, estudios adicionales

especiales, más la experiencia y conocimientos de los miembros que la integran, está analizando los alcances, objetivos y características de cada uno de los factores que intervienen en las mencionadas relaciones.

Los objetivos que se ha propuesto la Comisión son:

- Investigar y evaluar los pavimentos superiores existentes en Chile, tanto rígidos como flexibles, para ponderar su comportamiento efectivo en relación al esperado y procurar determinar las causas que pudieran originar deterioro prematuro, donde ello hubiese ocurrido.
- Validar y adecuar el método AASHTO a la realidad de nuestro país, y analizar los principales fenómenos que producen el deterioro, de manera que puedan ser más claramente comprendidos por todos los agentes relacionados con la gestión de pavimentos.
- Analizar las soluciones propuestas por AASHTO, para repavimentaciones.
- Estudiar sistemas de evaluación de pavimentos que incluyan una evaluación técnica y económica de largo plazo, de modo de maximizar los beneficios para el país. Evaluación Económica de Proyectos Viales, que contemple los costos de construcción, rehabilitación, mantención, ingeniería y administración, externalidades positivas y negativas, entre otros.

De los estudios efectuados hasta la fecha, surgen una serie de aspectos importantes que se ha estimado conveniente dar a conocer a los Profesionales e Instituciones interesadas en el tema. La información contenida en este documento no es un método o norma para diseñar pavimentos. Su objetivo es:

- Proponer algunos procedimientos y consideraciones que forman parte de la buena práctica del diseño.
- Entregar los resultados de estudios y experiencias realizadas en el país.
- Destacar la importancia que en el buen desempeño de los pavimentos tienen ciertos factores, y por lo tanto, la conveniencia de arbitrar medios para considerarlos en forma preferencial.
- Describir el uso de técnicas de prospección nuevas o de uso no habitual en el país.

Otro aspecto muy importante que ha surgido de los estudios e intercambio de información entre los miembros de la Comisión, es la conveniencia que el proyectista diseñe estructuras que utilicen al máximo las propiedades de los materiales y las condiciones que se dan en el área del proyecto. Se debe evitar la utilización de soluciones y especificaciones tipos que no consideren las condiciones y técnicas particulares del proyecto y la posibilidad de optar por diseños alternativos, incorporando las tecnologías y procedimientos más recientes, tanto en uso en Chile como en otros países.

Este documento es el primer informe general (INFORME N°1) preparado por la Comisión y será complementado en el futuro con otros a medida que se desarrollen nuevos estudios. Esta información ayudará al mejor diseño de nuestros pavimentos, y en definitiva, lograr que las inversiones en obras viales sean cada día más rentables para el país.

El documento contiene una descripción general del método AASHTO y sus principales parámetros, un diagnóstico del comportamiento de pavimentos diseñados con el método AASHTO en Chile y recomendaciones de los valores de los parámetros a utilizar, a juicio de la Comisión.

II. EL METODO AASHTO

2.1 Elección

El método AASHTO para diseño de pavimentos, a pesar de tener limitaciones, es el de uso más extendido en el país. Define algoritmos para los pavimentos flexibles y rígidos, que permiten establecer diseños equivalentes para ambos tipos de pavimentos. Entrega metodologías de diseño para distintas combinaciones de rehabilitación de pavimentos, sean flexibles o rígidos, considerando diferentes alternativas de refuerzo y permite incorporar la experiencia local a través de la evaluación de los diferentes parámetros de las fórmulas.

Es interesante notar que el método está en constante perfeccionamiento a través de estudios orientados a mejorar el alcance de las fórmulas y obtención de los parámetros involucrados. Es así como recientemente en USA, la investigación denominada "Strategic Highway Research Program" (SHRP) ha seguido el trabajo de AASHTO no sólo en el campo del diseño estructural de pavimento, sino también lo ha extendido al estudio de los materiales y mezclas que se usan en carreteras. Ejemplos de estos estudios son:

- Nuevas especificaciones para asfaltos vírgenes, modificados y reciclados.
- Nuevos ensayos para asfaltos que consideran uso y medio ambiente.
- Especificaciones para mezclas asfálticas de acuerdo al comportamiento en terreno. Este estudio generó lo que se llama SUPERPAVE.
- Estudios de comportamiento de pavimentos a largo plazo. (LTPP).
- Revisión de las fórmulas de diseño AASHTO.
- Nuevos ensayos para materiales de uso en carreteras.

2.2 Ecuaciones Básicas del Diseño

Las ecuaciones básicas usadas para pavimentos flexibles y rígidos, expresados en unidades del Sistema Internacional de unidades (SI), que propone la Guía AASHTO son las siguientes:

Pavimentos Flexibles

$$EE = (NE + 25.4)^{9.36} 10^{-(16.40 - Z_R S_o)} M_R^{2.32} \left(\frac{P_i - P_f}{4.2 - 1.5} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

$$\beta = 0.40 + \left[\frac{97.811}{NE + 25.4} \right]^{5.19}$$

Pavimentos Rígidos

$$EE = \left[\frac{H + 25.4}{25.882} \right]^{7.35} 10^{\alpha} \beta^{(4.22 - 0.32 p_f)}$$

$$\alpha = \frac{\log \left[\frac{P_i - P_f}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \left[\frac{180.779}{H + 25.4} \right]^{8.46}} + Z_R S_o$$

$$\beta = \frac{Rm Cd}{1.487 J} \left[\frac{H^{0.75} - 12.808}{H^{0.75} - 83.200 \left(\frac{K}{E} \right)^{0.25}} \right]$$

2.3 Parámetros

Los parámetros y sus unidades para ambos tipos de pavimentos se encuentran en la Tabla 2.1.

TABLA N° 2.1

Parámetros que usa el método de diseño AASHTO

Símbolo	Unidades	Descripción	Asfalto	Hormigón	Punto de Referencia
EE	Nº	Solicitud del Tránsito en ejes equivalentes	x	x	2.3.1
Z _R	-	Coefficiente estadístico asociado a la confiabilidad	x	x	2.3.2
S _o	-	Desviación estándar combinada en la estimación de los parámetros y del comportamiento del modelo	x	x	2.3.2
ΔPSI	-	Diferencia entre el Índice de Serviciabilidad inicial, p _i y el final, p _f	x	x	2.3.3
M _R	MPa	Módulo Resiliente de la subrasante	x	-	2.3.4
K	MPa/m	Módulo de Reacción de la subrasante	-	x	2.3.5
a _i	-	Coefficiente estructural de la capa i	x	-	2.3.6
m _i	-	Coefficiente de drenaje de la capa granular i.	x	-	2.3.7
C _d	-	Coefficiente de drenaje de la capa granular.	-	x	2.3.7
R _m	MPa	Resistencia media a la flexotracción a 28 días	-	x	2.3.8
E	MPa	Módulo de elasticidad del hormigón	-	x	2.3.8
J	-	Coefficiente de transferencia de carga entre losas.	-	x	2.3.9
*NE	mm	Número Estructural	x	-	2.3.6
H	mm	Espesor de la losa de pavimento	-	x	2.2

* NE : número estructural, dado por

$$NE = \sum a_i m_i h_i ; \quad \text{donde:}$$

a_i y m_i, están descritos más arriba y "h_i" es el espesor de la capa "i" en milímetros.

2.3.1 Tránsito

Los resultados de la Prueba de Carreteras AASHO mostraron que el daño que produce un eje con una carga determinada puede representarse por el número de pasadas de un eje simple de 80 kN (8.16 ton) de rueda doble, considerado como eje patrón, que produce un daño similar. Distintas configuraciones de ejes y cargas inducen daños diferentes al pavimento, pudiendo asociarse dicho deterioro al producido por un determinado número de ejes convencionales de 80 kN de carga por eje simple, rueda doble.

Este parámetro se evalúa en forma diferente para cada tipo de pavimento. Cabe destacar que la Comisión está desarrollando un estudio que aborda estos aspectos.

Capacidad de la pista de diseño

Es recomendable, especialmente para tránsitos altos analizar la posibilidad que la pista experimente saturación antes del término del período de diseño. Una pista determinada admite un número máximo de vehículos y por lo tanto un máximo de EE. En estos casos debe tenerse presente que esto podría limitar la sollicitación de tránsito de diseño y adicionalmente disminuir la incertidumbre en la predicción del tránsito.

Distribución del tránsito en la pista de diseño

La distribución del tránsito pesado en la carretera depende del número de pistas y del volumen total de tránsito (TMDA). Se han examinado algunos estudios [Taragin, A., 1958] [Darter, M. I., 1985] pero no parecen adecuados a la realidad de Chile; por lo cual la Comisión tiene en estudio este problema.

2.3.2 Confiabilidad

La confiabilidad de diseño (R) es la probabilidad que una sección homogénea de pavimento, usando el método, se comporte de acuerdo a lo que predice el modelo, para la sollicitación de la acción conjunta de tránsito y medio ambiente durante el período de diseño.

Una extensión del concepto de confiabilidad se adjunta en Anexo 1.

Coefficiente Estadístico Z_R

El coeficiente estadístico Z_R está asociado a una confiabilidad (R) para un conjunto de datos en una distribución normal.

Desviación Estándar Combinada S_o

La Desviación estándar combinada S_o es una medida de los errores de predicción del tránsito y de los otros factores que afectan al comportamiento del pavimento.

A esta desviación contribuyen por ejemplo: construcción, medio ambiente, incertidumbre del modelo, tránsito. Todos en conjunto contribuyen a la variabilidad total " S_o ".

Proposición de Niveles de Confianza y Factores Estadísticos Asociados

En las Tabla 2.2 se presentan los niveles de Confianza y factores estadísticos asociados, propuestos por esta Comisión, a ser usados en el diseño ambos tipos de pavimentos de vías interurbanas bajo condiciones normales.

En vías urbanas los niveles de Confianza no deberían fijarse normalmente en base sólo a las solicitudes de tránsito, sino más bien de acuerdo a la importancia de la vía y su dificultad posterior de rehabilitación. Asimismo en casos especiales tales como túneles, accesos a viaductos importantes, intersecciones, etc.

Tabla 2.2
PAVIMENTOS DE ASFALTO Y DE HORMIGON

Solicitud de		Factor Z_R	Factor So	
Tránsito en Pista Diseño (Mill.EE)	Nivel de Confianza R% (*)		Asfalto	Hormigón
≤5	50 - 60	0.000 - 0.253	0.45	0.35
5 a 15	50 - 70	0.000 - 0.524	0.45	0.35
15 a 30	60 - 75	0.253 - 0.674	0.45	0.35
30 a 50	70 - 80	0.524 - 0.841	0.44	0.34
50 a 70	70 - 85	0.524 - 1.037	0.42	0.32
70 a 90	70 - 90	0.524 - 1.282	0.40	0.30

(*) Para pavimentos flexibles usar el mayor valor del rango si los suelos son débiles y el drenaje es pobre.

Diseño de pavimentos por etapas

En caso de abordar el diseño de un pavimento por etapas, la Guía AASHTO plantea asumir una confiabilidad propia para cada etapa igual a $R^{1/n}$, siendo "n" el número de etapas y R la confiabilidad final del proyecto. No obstante lo anterior, se pueden usar confiabilidades distintas para diferentes etapas, siempre y cuando la combinación de ellas cumpla con la confiabilidad final.

2.3.3 Serviciabilidad

Serviciabilidad es la condición de un pavimento para proveer un manejo seguro y confortable a los usuarios, en un determinado momento. De acuerdo al método AASHTO, se mide cuantitativamente a través del Índice de Serviciabilidad, "p", en una escala de 0 a 5, siendo 5 el mejor valor.

Indice de Serviabilidad Inicial

El Índice de Serviabilidad Inicial, p_i , es el valor de este indicador al momento de puesta en servicio del camino. AASHTO recomienda un $p_i=4.5$ para pavimentos de hormigón y $p_i =4.2$ para pavimentos de asfalto, que fueron los valores obtenidos en la prueba AASHTO.

Para sensibilizar el efecto que en las fórmulas AASHTO tiene el Índice de Serviabilidad Inicial en la vida del pavimento, se comparó las sollicitaciones admisibles para distintos valores de " p_i " respecto de las que resultan al aplicar los valores usados por AASHTO; el índice de serviabilidad final fue de 2.5. El cálculo se hizo para distintos niveles de tránsito y diferentes valores de soporte M_R y K .

En los pavimentos de hormigón el cambio en EE, expresado como porcentaje, es una relación lineal única con el " p_i ", independiente del nivel de tránsito, del valor de soporte de los suelos y del parámetro " J ".

En los pavimentos de asfalto, las relaciones son lineales y función de los niveles de tránsito y del valor de soporte de los suelos, entre $p_i = 3.6$ y 4.8 .

Estas relaciones permiten concluir la importancia del Índice de Serviabilidad Inicial en la durabilidad de un pavimento (Anexo 2). Estudios realizados en Estados Unidos muestran que las curvas de deterioro reales de dos pavimentos de igual estructura, pero con p_i diferente, son paralelas, es decir, el pavimento con un p_i más bajo alcanzará un p_r antes que otro igual con un p_i mayor; o dicho en otra forma: el pavimento permite sólo una fracción del tránsito para un mismo índice de serviabilidad final (p_r).

A modo de ejemplo, se presenta la siguiente Tabla 2.3 extraída del estudio en el Anexo 2.

Tabla 2.3

Cambio porcentual en EE en función del "p_i" respecto a los EE para un p_i de referencia de 4.2 y un p_r = 2.5

p _i	P A V I M E N T O	
	Flexible	Rígido
	%	%
3.6	- 75.0	- 34.2
3.9	- 37.5	- 17.2
4.2	0.0	0.0
4.5	37.5	17.2
4.8	75.0	34.2

Nota: En pavimentos flexibles la variación de EE admisibles depende del tránsito y del M_R. En el cuadro se presenta la variación porcentual para 50x10⁶ EE y M_R = 40 Mpa. Para los pavimentos rígidos los valores no dependen del tránsito, del K ni de J.

Dada la importancia económica que tiene el "p_i" sobre el comportamiento de los pavimentos, se enfatiza la conveniencia de conseguir valores altos de la serviciabilidad inicial.

Existe inquietud por parte de esta Comisión porque se ha observado valores de p_i de construcción inferiores a los considerados en el diseño, situación que producirá un deterioro prematuro al pavimento.

Indice de Serviciabilidad Final

El Índice de Serviciabilidad Final (p_r) es el nivel mínimo elegido para intervenir el pavimento a través de un proceso de rehabilitación.

Relaciones entre la serviciabilidad (p) y el Índice de Rugosidad Internacional - (IRI)

En el estudio [Dujisin, D., 1995], encargado por esta Comisión, se estableció las siguientes fórmulas preliminares para relacionar la serviciabilidad (p) con el Índice de Rugosidad Internacional (IRI en m/km) para ambos tipos de pavimentos:

Pavimento	Fórmula
Asfalto	$p = 5.85 - 1.68 \text{ IRI}^{0.5}$
Hormigón	$p = 7.10 - 2.19 \text{ IRI}^{0.5}$

2.3.4 Módulo Resiliente

Módulo Resiliente de Diseño

Las ecuaciones AASHTO [AASHTO, 1993] de diseño fueron desarrolladas usando VALORES MEDIOS y considerando las dispersiones reales que suelen presentar los parámetros. En consecuencia, el módulo resiliente de diseño, M_R , debe corresponder al VALOR MEDIO de una serie asociada a una desviación estándar (S) concordante con las hipótesis de cálculo.

El M_R de diseño del conjunto de la subrasante debe ser el valor medio (M_{Rm}), siempre que el conjunto de la serie entregue un coeficiente de variación no superior al 15%. Ello implica, aceptando una distribución normal, que el 99% de los valores integrantes de la muestra (en la práctica todos) deben estar comprendidos en el rango $M_{Rm} \pm 3S$, o más simplemente, el rango de valores aceptables para adoptar un determinado M_R de diseño, debe estar comprendido entre $0.55 M_{Rm}$ y $1.45 M_{Rm}$.

Para los M_R menores que el límite inferior del rango deben calcularse otros tramos independientes, o proyectar un mejoramiento, si dichos valores representan pequeños sectores localizados. En el Anexo 3 se presenta un procedimiento estudiado por la Comisión para determinar el M_R de diseño, a partir de una serie de valores.

Determinación del Módulo Resiliente (M_R)

Para establecer el valor del módulo resiliente de diseño normalmente se utilizan en Chile relaciones que lo vinculan al CBR. Dado que el valor obtenido en el laboratorio no representa necesariamente el valor "in situ" es recomendable usar métodos que reflejen directamente las propiedades de los suelos o de la estructura del pavimento. Una alternativa que proporciona resultados más confiables, es mediante mediciones de penetración de cono dinámico ($\phi = 20$ mm), cuya relación con el valor CBR ha sido ampliamente estudiada, en otros países y también en Chile.

En el Anexo 4 se incluye un instructivo para el uso del Cono de Penetración Dinámico.

En el estudio "Uso de los Resultados del Deflectómetro de Impactos en el Método de Diseño AASHTO 1993" [APSA, Oct.1996], preparado para la Comisión, se dan metodologías para obtener el M_R de diseño usando el FWD.

La Comisión tiene previsto realizar estudios que permitan establecer una relación directa entre el índice de penetración con cono dinámico y el módulo resiliente. Para tal efecto se propone correlacionarlo con mediciones del módulo resiliente en terreno usando ensayos no destructivos tales como el Deflectómetro de Impacto (FWD) y determinaciones mediante ensayos en el laboratorio.

2.3.5 Módulo de Reacción de la Subrasante (K)

El módulo de reacción de la subrasante (K), parámetro que se usa para caracterizar el suelo de la subrasante en un pavimento rígido, ha experimentado cambios conceptuales en los procedimientos para determinarlo y paralelamente se han desarrollado nuevos criterios de diseño.

Subsisten por lo tanto en la actualidad diferentes procedimientos de cálculo, sin que se haya modificado la denominación del parámetro, lo que eventualmente origina confusiones.

El método AASHTO original, utilizó una prueba de carga estática sobre un plato rígido de 760 mm de diámetro, para determinar el valor "K". Por razones de tiempo y costo del ensayo, hoy casi no se ejecuta. Normalmente a este "K" se le denomina estático.

En la versión de 1993, AASHTO [AASHTO; 1993] determina el valor "K", simplemente como una proporción directa del valor del módulo resiliente. Este procedimiento origina valores muy altos respecto a los de la prueba de la placa, por lo que subsisten dudas acerca de su bondad.

Paralelamente con el advenimiento de nuevos métodos de diseño se ha desarrollado el cálculo de este parámetro mediante procedimientos mecanicistas usando preferentemente medidas de deformación obtenidas con el deflectómetro de impacto. A los valores obtenidos por este procedimiento se les denomina "K" dinámico. En el caso de suelos finos, únicos estudiados por AASHTO, estos últimos son del orden del doble de los "K estáticos".

En el mismo estudio mencionado en punto 2.3.4, se dan metodologías para obtener el $K_{\text{diseño}}$ usando el FWD.

El cálculo del "K" por uno u otro procedimiento presenta además otra diferencia importante; mientras los valores que se obtienen con la prueba de placa son influidos por la presencia de capas superiores de poco espesor y de mejor calidad (sub-base), los calculados mediante deflexiones no se ven afectados por esas capas, teniendo una influencia preponderante, suelos existentes a bastante profundidad (> 2 m. bajo la subrasante); esto es muy importante cuando se analiza la situación de un suelo fino cubierto con un terraplén de buena calidad y de un espesor de cierta importancia.

En consideración a que en nuestro país se presenta con cierta frecuencia la situación descrita, en el mismo estudio de punto 2.3.4 se presenta una proposición preliminar que considera el efecto de un terraplén en el valor de "K". En todo caso debe notarse que el valor "K" no tiene una influencia significativa en el espesor del pavimento, por lo cual es innecesaria una gran precisión en la estimación de su valor.

En resumen, para adoptar el "K" a usar con AASHTO debe tenerse en consideración lo siguiente:

- No parece recomendable usar la relación $K-M_R$ que da la versión 1993 de AASHTO.
- Cuando se dispone del "K" determinado por deflectómetro de impacto, se recomienda dividirlo por 2 para usar en AASHTO, cuando se trata de suelos finos y relaciones tales como las incluidas en el estudio de Punto 2.3.4, para suelos granulares o una combinación de ambos.

- Está en duda cual es el aporte real de una sub-base sobre el valor "K".
- Aún cuando no puede asegurarse que las relaciones K-CBR, que figuran en el Manual de Carreteras, representen el real comportamiento del pavimento, hasta que no exista un consenso respecto a este parámetro, parece adecuado seguir usándolas. El valor de otras fórmulas propuestas tiene la misma validez que las fórmulas que propone el Manual de Carreteras.

2.3.6 Estructuración

Capas Estructurales

Para que una capa de agregados no ligados pueda considerarse como una "capa estructural" con su correspondiente "coeficiente estructural", ella debe ser homogénea en dimensiones y propiedades mecánicas. La homogeneidad implica cumplir con los siguientes requisitos:

- El M_R debe ser mayor que el de la capa subyacente y aproximadamente constante.
- La granulometría debe ser semejante en toda la extensión, sin presentar segregaciones.
- El tamaño máximo debe ser compatible con los requerimientos para extenderla, perfilarla y compactarla (en general, el TM no debe exceder de 1/3 del espesor de la capa).

Módulos de Elasticidad

El módulo de elasticidad de las capas de bases y sub-bases está, en gran medida, influenciado por las condiciones de tensiones a que se encuentran sometidas. Mediciones muy completas ejecutadas en terreno [Heukelom & Klomp, 1962] [Klomp & Dormon, 1964] sustentadas por análisis teóricos, muestran que el módulo de una base no ligada (E_2) depende de su espesor (h_2) y del módulo de la subrasante subyacente (E_3) de acuerdo con la siguiente relación :

$$E_2 = F_2 E_3, \quad \text{en que } F_2 = 0.2 (h_2)^{0.45}, \quad h_2 \text{ en mm}$$

Los valores límites del factor F_2 son $2 < F_2 < 4$; factores mayores de 4 para la base no se adoptan, ya que darían origen a tensiones superiores a las que el material puede soportar. Sin embargo, si una base no ligada se inserta entre dos capas ligadas, se pueden alcanzar, para esa base, valores del módulo mayores.

Los párrafos precedentes que han sido extraídos del Método de Diseño Shell [Shell, 1978] obligan a que la estructuración de las capas conduzca a que los módulos elásticos no sobrepasen las relaciones precedentes.

En atención a lo expuesto se recomienda que para pavimentos de asfalto la relación de los módulos resilientes de capas no ligadas sucesivas esté comprendido entre 2 y 3, siempre que no se exceda el valor del módulo de la capa superior.

El método Shell caracteriza la subrasante por el módulo dinámico; el valor de este parámetro es función de la tensión. Se recomienda que el módulo dinámico tanto para la subrasante como de las bases y subbases, se estime por retroanálisis de cuencas de deflexiones. En forma alternativa se pueden usar ensayos de laboratorio tales como el ensayo triaxial dinámico.

Para pavimentos rígidos el método AASHTO-1993 [AASHTO, 1993] sugiere limitar la razón entre el módulo de la sub-base y subrasante a un máximo de 4 para capas no ligadas para prevenir una condición artificial.

Coefficientes Estructurales

Estos coeficientes se aplican en la estructuración de los "pavimentos flexibles".

Los Coeficientes de Capa (a_i) fueron obtenidos durante la ejecución de la pruebas AASHTO y están ligados a la capacidad de las diferentes capas de transmitir cargas.

Se identifican los coeficientes estructurales según la capa y posición.

Módulo elástico de mezclas asfálticas y coeficiente estructural (a_i)

Existe una relación entre el módulo elástico de una mezcla de concreto asfáltico y el coeficiente estructural (a_i) que le corresponde; a mayor módulo elástico, mayor coeficiente estructural. Se recomienda precaución con mezclas cuyos módulos de elasticidad sean > 3100 Mpa.

Aunque concretos asfálticos con módulos de elasticidad altos son más rígidos y resistentes a flexión, ellos son también más susceptibles a grietas térmicas y de fatiga. En tales casos cementos asfálticos modificados con polímeros, logran disminuir la susceptibilidad de la

viscosidad del bitumen a los cambios de temperatura, dando viscosidades apropiadas para mezclas fuertes sometidas a bajas y altas temperaturas. De acuerdo al módulo de elasticidad, se asignan valores al término a_1 . La guía AASHTO [AASHTO, 1993] proporciona un gráfico para cuantificar a_1 de acuerdo al Módulo Elástico; dado que este módulo requiere de un ensayo especializado y no está fácilmente disponible, se usa en su reemplazo la Estabilidad Marshall.

Coefficientes de las Capas de Base (a_2)

También la Guía AASHTO [AASHTO, 1993] proporciona gráficos para evaluar el Coeficiente de las distintas capas de base, (a_2). Se presentan gráficos para bases granulares, bases ligadas con asfalto y con cemento. Se puede agregar como información las fórmulas que presenta el TRRL Laboratory Report 673 [Hodges, Rolt and Jones, 1975].

Las fórmulas son:

- Bases Granulares

$$a_2 = [29.14 \text{ CBR} - 0.1977 \text{ CBR}^2 + 0.00045 \text{ CBR}^3] 10^{-4}$$

- Bases estabilizadas con cemento:

$$a_2 = [750 + 386 r - 8.83 r^2] 10^{-4}$$

r = Resistencia a la compresión cilíndrica en Mpa (ASTM D - 1633)

Coeficiente de la Capa de Sub-base, a_3

También la Guía AASHTO proporciona gráficos para evaluar el coeficiente de la Sub-base, a_3 .

El Informe TRRL proporciona una fórmula para el coeficiente de la sub-base, a_3 en base al CBR; la fórmula es la siguiente

$$a_3 = 0.01 + 0.065 \log_{10} \text{CBR}$$

2.3.7 Drenaje

Las ecuaciones de diseño incluyen los coeficientes de drenaje m_i y C_d para tomar en cuenta la influencia del agua en el comportamiento de los pavimentos flexibles y rígidos, respectivamente.

Coefficientes de Drenaje para Pavimentos de Asfalto (m_i)

Para cuantificar la influencia del drenaje en la estructura del pavimento, se usan los coeficientes de drenaje (m_i), que modifican a los coeficientes estructurales de las distintas capas granulares del pavimento.

Estos coeficientes fueron desarrollados considerando la situación cuando las distintas capas granulares sobrepasan el 50% del grado de saturación.

El método AASHTO incluye una tabla para establecer el coeficiente de drenaje m_i para bases y sub-bases granulares. Ver Tabla 2.4.

Tabla 2.4
VALOR DEL COEFICIENTE DE DRENAJE m_i
DE LAS CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUB-BASE
RECOMENDADO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Calidad del Drenaje	Tiempo de Remoción del agua	Porcentaje del tiempo en que la estructura esta expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación			
		< 1%	1 a 5%	5 a 25%	> 25%
Excelente	2 horas	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Bueno	1 día	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Regular	1 semana	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Malo	1 mes	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy malo	No drena	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

Coefficiente de Drenaje para Pavimentos de Hormigón (C_d)

El método considera un coeficiente de drenaje, (C_d) para los pavimentos de hormigón. Ver Tabla 2.5

TABLA 2.5
VALOR DEL COEFICIENTE DE DRENAJE C_d
RECOMENDADO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS

Calidad del Drenaje	Tiempo de Remoción del agua	Porcentaje del tiempo en que la estructura esta expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación			
		< 1%	1 a 5%	5 a 25%	> 25%
Excelente	2 horas	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Bueno	1 día	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Regular	1 semana	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Malo	1 mes	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy malo	no drena	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Proposiciones de uso de los Coeficientes de Drenaje

Se analizó la forma de determinar estos factores para las condiciones chilenas a través de un estudio sobre drenabilidad y tiempos de saturación [LEN y Asociados, 1994].

Como resultado se generaron las Tablas 2.6, 2.7 y 2.8 que permiten obtener las condiciones para usar los coeficientes de drenaje de las tablas AASHTO, válidas para ambos tipos de pavimentos.

Tabla 2.6
CALIDAD DEL DRENAJE

Calidad Base / Sub-Base		Calidad Drenaje Subrasante	Clasificación del Drenaje	
Permeabilidad k(cm/s)	Finos < 0.08 mm (%)		Calzada "A"	Calzada "B"
> 0.35	-	Bueno	Excelente	Excelente
		Regular	Excelente	Excelente
		Malo	Excelente	Excelente
10^{-2} - 0.35	0 - 2	Bueno	Excelente	Excelente
		Regular	Excelente	Bueno
		Malo	Bueno	Bueno
$10^{-2.75}$ - 10^{-2}	2 - 5	Bueno	Excelente	Bueno
		Regular	Bueno	Bueno
		Malo	Bueno	Bueno
$10^{-3.25}$ - $10^{-2.75}$	5 - 10	Bueno	Bueno	Bueno
		Regular	Bueno	Regular
		Malo	Regular	Regular
$10^{-4.5}$ - $10^{-3.25}$	10 - 12	Bueno	Regular	Regular
		Regular	Regular	Regular
		Malo	Regular	Malo
< $10^{-4.5}$	> 12	Bueno	Regular	Malo
		Regular	Malo	Muy Malo
		Malo	Muy malo	Muy Malo

CALIDAD DRENAJE SUBRASANTE	PERMEABILIDAD k (cm/s)
Bueno	> 10^{-2}
Regular	10^{-5} - 10^{-2}
Malo	< 10^{-5}

Calzada Tipo	Características
A	Doble bombeo o dren de pavimento
B	Bombeo único, sin dren de pavimento

Tabla 2.7
Precipitación Media Anual estimada
para las Distintas Regiones del País

Precipitación Media Anual (mm)	Región
< 20	I, II , III
20 - 200	IV
200 - 400	IV, V, RM, VI y XII
400 - 600	V, RM, VI, VII, VIII, IX Y XII
600 - 1.000	V, RM, VI, VII, VIII, y IX
1.000 - 1.500	VII, VIII, IX, X, XI y XII
> 1.500	VII, VIII, IX, X, XI y XII

Notas: Si hay datos de precipitación media anual para un proyecto específico, usar esa información.

Dentro de la misma Región hay zonas con distintas precipitaciones medias anuales

Tabla 2.8
TIEMPO DE SATURACION A QUE ESTA
EXPUESTA LA ESTRUCTURA (%)

Precipitación Media Anual [mm]	Profundidad Napa de agua Respecto Subrasante [m]	Calidad del Saneamiento Superficial	Tiempo bajo Saturación de la Estructura (%)
< 20	-	-	< 1
20 - 200	> 0.50	Bueno Regular Malo	< 1 1 - 2 2 - 3
	≤ 0.50	Bueno Regular Malo	< 1 2 - 3 3 - 5
200 - 400	> 0.50	Bueno Regular Malo	1 - 2 2 - 4 4 - 6
	≤ 0.50	Bueno Regular Malo	2 - 4 4 - 6 6 - 8
400 - 600	> 0.50	Bueno Regular Malo	2 - 3 3 - 5 5 - 7
	≤ 0.50	Bueno Regular Malo	3 - 5 5 - 7 7 - 9
600 - 1.000	> 0.50	Bueno Regular Malo	3 - 4 4 - 6 6 - 8
	≤ 0.50	Bueno Regular Malo	4 - 6 6 - 8 8 - 12
1.000 - 1.500	> 0.50	Bueno Regular Malo	4 - 5 5 - 7 7 - 12
	≤ 0.50	Bueno Regular Malo	5 - 7 7 - 10 10 - 16
> 1.500	> 0.50	Bueno Regular Malo	5 - 8 8 - 12 12 - 16
	≤ 0.50	Bueno Regular Malo	6 - 10 10 - 25 > 25

Ejemplo de Aplicación

Datos

- Pavimento flexible
- Ubicación: IV Región
- PMA = 300 mm
- Subrasante: $k = 10^{-3}$ cm/s
- Características calzada:
 - Bombeo único, sin dren de pavimento
- Profundidad de napa de agua ≥ 0.50 m.
- Calidad del saneamiento superficial: regular

Solución

Entrando en tablas 2.6, parte inferior con :

- Permeabilidad de la subrasante, $k = 10^{-3}$ cm/s
Calidad del drenaje subrasante: regular
- Característica calzada: Tipo B
- Parte superior de tabla 2.6 con:
% en malla 0.08 mm = 7% y los datos de arriba resulta:
Calidad del drenaje = Regular.

Según Tabla 2.7, usando la ubicación: IV Región y precipitación de 300 mm; se elige precipitación media anual (PMA) entre 200 - 400 mm.

Según tabla 2.8 con:

- PMA = 200 - 400 mm
 - Profundidad napa de agua ≥ 0.50 m.
 - Calidad del saneamiento: Regular
- Resulta tiempo de saturación: entre 2% y 4%

Según tabla 2.4 con

Calidad de drenaje: Regular y

Tiempo de saturación = 2 - 4%;

resultan valor de m_i entre 1.15 y 1.05; para el rango entre 1 a 5%

El valor intermedio para el tiempo de saturación sería de 3%, interpolando entre 1.15 y 1.05; daría un $m_i = \underline{1.10}$.

2.3.8 Propiedades del Hormigón

Resistencia Media a Flexotracción a 28 días del Hormigón (R_m)

Manteniendo el criterio de la Guía AASHTO se deben usar los valores medios de la Resistencia a flexotracción a 28 días (R_m) usando carga en el tercio central (AASHTO T97 o ASTM C78), como resistencia de diseño.

Los valores medios obtenidos en obra son del orden de 4.8 a 5.4 Mpa a los 28 días. En atención a esta realidad chilena se proponen, en Tabla 2.9, los siguientes rangos de Resistencias Medias (R_m) y Coeficientes de Variación (C_v), de acuerdo al Tipo de Carretera.

Tabla 2.9
Rangos de R_m y C_v de acuerdo al tipo de Carretera

Tipo de Carretera	Resistencia Media a Flexotracción a 28 días del Hormigón, R_m (Mpa)	Coefficiente Variación, C_v (%)	Observaciones
Vías principales y Autopistas	4.8 - 5.4	< 10	Plantas Automáticas, d.p.p.
Vías Colectoras	4.6 - 5.0	10 - 15	Dosif. por peso
Caminos Secundarios	4.2 - 4.8	15 - 20	Dosif. por peso

Módulo de Elasticidad del Hormigón (E)

En la fórmula para diseño de pavimentos de hormigón de la Guía AASHTO interviene el Módulo de Elasticidad del Hormigón (E); este parámetro se obtiene a través de ensayos a compresión estática con medición de deformaciones. Para pavimentos existentes E se puede obtener a través de Ensayos No Destructivos (END), como el Deflectómetro de Impacto (FWD), usando métodos de retroanálisis, teniendo presente que debe ser convertido a Módulo de Elasticidad a 28 días.

Al sensibilizar el parámetro E en la fórmula AASHTO se encuentra que su influencia es pequeña; por ejemplo en un diseño para 40×10^6 EE con suelos normales y valores usuales de J, R_m , C_d , Z_R , S_o , el espesor de la losa aumenta en 4.5 mm cuando el E varía de 24000 a 34000 Mpa; por esta razón, para los hormigones de uso en pavimentos en el país, se propone usar en general un $E = 29000$ Mpa a 28 días para el diseño usando la Fórmula AASHTO.

2.3.9 Coeficiente de Transferencia de Cargas (J)

El coeficiente de transferencia de carga J se usa para incluir en el diseño la capacidad de un determinado pavimento de transferir (distribuir) las solicitaciones a través de sus discontinuidades, como son juntas y grietas. Los dispositivos de transferencia de carga, la trabazón mecánica y la presencia de bermas de hormigón tienen todos distintos efectos sobre J.

Los orígenes de este factor están ligados con la extensión teórico-empírica realizada el año 1961, que relacionó ejes equivalentes con la relación S_e/σ . En esta última, σ representa la tensión de esquina de Spangler y es por tanto responsable de la aparición de las variables E, μ y K en la ecuación de diseño. La ecuación de Spangler no tiene factor J sino un coeficiente numérico igual a 3.2. En 1972, cuando el método fue extendido a pavimentos con otros sistemas de transferencia de carga, se decidió generalizar la ecuación de Spangler a modo de compensar las diferencias de tensiones entre distintas maneras de transferir cargas.

De este modo se cambió el valor 3.2 por el parámetro denominado J. Evidentemente, la condición AASHTO fue fijada en $J=3.2$. Así $J=3.2$ representa pavimentos con barras en las juntas, además de todas las otras características propias de la prueba (construcción, clima, etc.). Los demás J fueron calculados en base a razones de tensiones, suponiendo que la relación $\sigma_{max}/S_{SPANGLER}$ de la prueba AASHTO se mantiene constante. AASHTO generó así su tabla de recomendación con los últimos ajustes en 1986, y presentada en forma idéntica en 1993.

De acuerdo a esas recomendaciones, el J a emplear en los caminos típicos chilenos estaría en el rango 3.8 - 4.4 (pavimento de hormigón con trabazón mecánica y berma asfáltica) y 3.6 - 4.2 (pavimento de hormigón con trabazón mecánica y berma de hormigón).

Sin embargo, resultados de recientes investigaciones basadas en la transferencia de carga de pavimentos chilenos, permiten concluir que tales valores son muy elevados. Los valores recomendados por esta Comisión para pavimentos sin dispositivos de transferencia de carga en las juntas, bermas asfálticas o granulares y losas entre 3.5 y 5 m serían:

En la zona centro (Santiago - Chillán): 3.5 - 3.7

En la zona sur (Chillán - Chiloé): 3.2 - 3.5

Con respecto al efecto de las bermas pavimentadas con hormigón, este estudio no permite concluir recomendaciones, sin embargo, dados los resultados obtenidos en otras investigaciones, se espera que el valor de J para estas condiciones sea del orden de 4 décimas menores que los indicados

III. DIAGNÓSTICO DEL USO DEL MÉTODO AASHTO EN CHILE

Por iniciativa de esta Comisión se promovió el estudio denominado "Evaluación Técnica de Pavimentos Existentes" según Método AASHTO-1993. Esta inquietud llevó a la ejecución de dos Memorias para optar al título de ingeniero civil de la Universidad de Chile [Arroyo, A., 1995] [Forero, E., 1996], una orientada a pavimentos de asfalto y la otra a pavimentos de hormigón.

La investigación dirigida a pavimentos flexibles consideró 15 tramos entre Carmen Alto en la segunda Región, provincia de Antofagasta, y Osorno en la décima Región, provincia de Osorno; distribuidos en 2.332 kilómetros desde Latitud $23^{\circ} 12'$ a $40^{\circ} 36'$; con variación de climas desde desérticos hasta altamente lluviosos y toda clase de suelos. Los niveles de tránsito acumulado en ejes equivalentes de 80 kN variaron entre 1.03 a 30.85 millones con un promedio de 6.69 millones y fechas de construcción de 1981 a 1990.

La memoria dedicada a pavimentos de hormigón consideró 27 tramos desde Longotoma en la IV Región, provincia de Petorca hasta Río Bueno en la X Región, Provincia de Valdivia con climas con lluvia moderadas hasta altamente lluviosos distribuidos a lo largo de 1.028 km, entre latitud $32^{\circ} 12'$ y $40^{\circ} 18'$. Los niveles de tránsito acumulado en ejes equivalentes a 80 kN variaron entre 2.3 y 28.1 millones con un promedio de 7.92 millones y fechas de construcción de 1975 a 1985.

La mayoría de las secciones incorporadas en ambos estudios corresponden a los Tramos Testigos estudiados por los convenios de seguimiento de Pavimentos entre el MOP y las Universidades de Chile y Católica.

Las principales conclusiones son las siguientes:

- **Pavimento de Asfalto**

- La ecuación de diseño AASHTO parece una buena herramienta para estimar las pérdidas de serviciabilidad real de las secciones estudiadas. Sin embargo, cabe destacar que las secciones estudiadas tenían un promedio de 9.7 años de vida y habían sido solicitadas en promedio por 6.7 millones de ejes equivalentes.

- La fórmula, complementada con la correcta estimación de los coeficientes de drenaje, se ajusta razonablemente al estado de las secciones analizadas según zonas geográficas, obteniéndose un comportamiento teórico similar al real.

- **Pavimentos de Hormigón:**
 - En las secciones estudiadas (2.3 a 28.1 millones de EE y 9 a 24 años de servicio, con promedios de 10.7 millones de EE y edad promedio de 14 años), el deterioro observado resultó menor que el pronosticado por la fórmula AASHTO.
 - En relación a distintas secciones homogéneas de hormigón, analizadas según localización, tipo de estructura, nivel de tránsito y espesor de la losa, no se observaron diferencias significativas en la predicción de su comportamiento. Dada la escasa existencia de pavimentos de hormigón en la zona norte, no se pudo sacar conclusiones respecto a la influencia de climas secos y calurosos. Los pavimentos estudiados están en zonas en que las precipitaciones medias anuales varían entre 300 mm y 2000 mm y temperaturas medias relativamente uniformes (entre 11 y 14,5°C). Dentro de estos márgenes climáticos no se detectó influencia del clima en el comportamiento de estos pavimentos.
 - La diferencia de comportamiento podría deberse a que AASHTO-1993 recomienda el rango 3,8 a 4,4 para el valor de J que toma en cuenta la eficiencia de la transmisión de cargas en las juntas para pavimentos sin barras de traspaso de cargas y bermas sin pavimentar. En el capítulo correspondiente al parámetro J, se muestra algunas mediciones en Chile, que indican que la transmisión de cargas en las juntas sería más eficiente que las propuestas en la guía AASHTO.

IV. CONCLUSIONES

El informe contiene conclusiones orientadas al diseño de estructuras de pavimentos mediante el método AASHTO. Es necesario dejar establecido que, desde la publicación de la guía de diseño en 1993, los propios autores, entre otros, han continuado realizando estudios complementarios, proponiendo algunas modificaciones. Por otra parte, es obvio que los criterios de diseño deben ser adaptados a las condiciones locales, tomando muy en cuenta la experiencia y evaluando el comportamiento real que han tenido los pavimentos.

La Comisión ha abordado los siguientes aspectos:

- validación y limitaciones a largo plazo del método aplicado a pavimentos flexibles y rígidos
- consideraciones referente al tránsito de diseño
- niveles de confiabilidad apropiados para usar en Chile
- alcances respecto a los índices de serviciabilidad y necesidad de mejorar los índices de serviciabilidad iniciales
- consideraciones referente al poder de soporte de los suelos
- recomendaciones respecto a estructuración de pavimentos
- tablas para cuantificar en forma más directa los coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles y rígidos para las condiciones imperantes en el país
- recomendaciones de los niveles de fatiga del hormigón a usar en los diseños
- consideraciones sobre el coeficiente de transferencia de cargas (J) y recomendaciones de valores a usar en Chile
- uso del Cono de Penetración Dinámico para determinar el poder de soporte de los suelos in-situ
- metodología para determinar el Módulo Resiliente (M_R) a ser usado en el método AASHTO
- recomendaciones para usar los resultados del Deflectómetro de Impacto en el método AASHTO

Las principales recomendaciones que surgen de los puntos precedentes son las siguientes:

Método AASHTO

El método de diseño AASHTO parece ser una herramienta apropiada para el diseño estructural de pavimentos. Debe ser, sin embargo, adecuado a las condiciones regionales y continuar evaluando su comportamiento real a través del tiempo.

El método de diseño AASHTO, predice razonablemente el comportamiento de los pavimentos, siempre que se usen parámetros apropiados a las condiciones locales y se diseñe ajustándose a los criterios básicos. En consecuencia es necesario continuar estudiando este método de diseño así como el comportamiento y los procedimientos de construcción de los pavimentos. La Comisión se compromete a continuar impulsando este tipo de estudios y extenderlos a los problemas de rehabilitación y conservación de pavimentos, uso de otros métodos de diseño, nuevas técnicas, nuevos materiales, entre otros. A futuro se abordarán los siguientes tópicos:

1. Distribución del tránsito pesado en carreteras divididas en Chile
2. Investigación de la correlación entre medidas de terreno del poder de soporte a través del CPD, FWD y ensayos de laboratorio tales como el Módulo Resiliente y CBR de laboratorio.

Indice de Serviciabilidad Inicial (p_i)

Al aplicar las fórmulas AASHTO normalmente se supone un Índice de Serviciabilidad Inicial de:

$p_i = 4.2$ para pavimentos de asfalto y de

$p_i = 4.5$ para pavimentos de hormigón

Por otra parte, y dado que, la tendencia es la de recepción de obras por rugosidad, se recomiendan los siguientes valores de IRI, calculados a partir de las relaciones indicadas en la sección 2.3.3:

$IRI_{inicial} = 1.0$ m/km, para pavimentos de asfalto y

$IRI_{inicial} = 1.4$ m/km para pavimentos de hormigón

La durabilidad del pavimento se ve fuertemente afectada por el valor del IRI inicial por lo que parecería recomendable establecer un criterio de premios y multas en función de la rugosidad inicial.

Tránsito de diseño

El tránsito, expresado en ejes equivalentes de 80 kN, es un factor determinante en el diseño. En rutas nuevas, la incertidumbre en los pronósticos hace que muchas veces el tránsito previsto sea sobrepasado por la realidad y, por lo tanto, es conveniente considerar factores de confiabilidad adecuados. A la inversa, en caminos que se rehabilitan o amplían a dobles calzadas y donde existen antecedentes históricos puede hacerse un pronóstico más realista. En todo caso, es importante verificar la capacidad de la vía por saturación.

Niveles de confiabilidad y factores estadísticos asociados

Los niveles de confiabilidad a adoptar en cada caso dependen básicamente del tránsito previsto para la vida de diseño. Cuando mayor es este último, mayor es el nivel de confiabilidad óptimo. Para el caso de pavimentos asfálticos se recomienda un menor valor, dentro de los rangos propuestos, si los suelos son de alta capacidad de soporte y el drenaje es bueno.

El valor de la desviación estándar combinada "So" recomendada por AASHTO es de:

So = 0.45 para pavimentos asfálticos y de

So = 0.35 para pavimentos de hormigón

Es aconsejable mantener estos valores en el diseño de rutas nuevas, pudiéndose reducir a medida que aumenta el tránsito solicitante, en especial en diseños de rutas en servicio, ya que este parámetro está sujeto a un error menor en la medida que el tránsito sea mayor.

Capacidad de soporte de la subrasante

Al evaluar la capacidad de soporte de los suelos de subrasante a través del ensayo CBR de laboratorio en muestras remoldeadas, pueden obtenerse valores que no representan su condición de equilibrio "in situ". Por esta razón es recomendable hacer determinaciones basadas en mediciones de penetración y/o deflexión; en el primer caso para pavimentos nuevos y, en el segundo, para repavimentación.

Para evaluar el módulo resiliente de diseño sobre capas granulares de base y/o subbase se recomienda utilizar la relación extraída del método Shell:

$$M_{R-1} = F_2 \times M_{R-2}$$

donde:

$$F_2 = 0.2 (h_2)^{0.45}, \quad 2 < F_2 < 4$$

M_{R-1} : módulo resiliente sobre capas granulares y

M_{R-2} : módulo resiliente sobre subrasante y:

h_2 : espesor capa granular en mm

No se recomienda usar la relación entre el módulo de reacción de la subrasante "K" y el módulo resiliente "M_R" que da la guía AASHTO.

Capas estructurales

Se hace énfasis particularmente en la homogeneidad de las capas granulares para que las tensiones en la estructura del pavimento se distribuyan en forma gradual y uniforme y el conjunto se comporte como un todo.

Coefficientes de drenaje

Se proporciona una metodología y tablas basadas en estudios patrocinados por la Comisión, para determinar estos factores para las condiciones chilenas.

Coefficiente de transferencia de cargas "J"

Se recomiendan los siguientes valores, para pavimentos sin dispositivos de transferencia de carga en las juntas, bermas sin pavimentos de hormigón y losas entre 3.5 y 5.0 m:

Zona centro (La Serena - Chillán)	3.5 - 3.7
Zona sur (Chillán - Chiloé)	3.2 - 3.5

En zonas litorales, se recomienda utilizar el menor valor de los respectivos rangos. Cuando se diseñe con bermas pavimentadas con hormigón, se sugiere que el valor de "J" sea del orden de 4 décimas menores que los indicados

V. ESTUDIOS ESPECIALES

A continuación se citan los estudios que sirvieron de base para la realización de este documento.

- **APSA, Recomendaciones para la Determinación del Coeficiente de Transferencia de Carga J en Pavimentos de Hormigón Chilenos, Santiago, Chile. - 1996 .**
- **APSA, Uso de los resultados del Deflectómetro de Impactos en el Método de Diseño AASHTO 1993, Santiago, Chile; 1996.**
- **Dujisin Q., D. y Arroyo A., A. Desarrollo de una Relación Índice de Serviciabilidad (P)- Índice de Rugosidad Internacional (IRI), Santiago, Chile; 1995**
- **LEN y Asociados Ltda. - Ingenieros Consultores, Drenabilidad y Tiempo de Saturación para Bases de Pavimentos, Santiago, Chile; 1994.**
- **Dujisin Q., D. y Arroyo A., A. Evaluación Técnica de Pavimentos Existentes según método AASHTO-93, Santiago, Chile; 1996**

VI. BIBLIOGRAFIA

- [APSA, Sept.1996] APSA, Recomendaciones para la Determinación del Coeficiente de Transferencia de Carga J en Pavimentos de Hormigón Chilenos, Santiago, Chile. - 1996 .
- [APSA, Oct.1996] APSA, Uso de los resultados del Deflectómetro de Impactos en el Método de Diseño AASHTO 1993, Santiago, Chile; 1996.
- [Arroyo, A., 1995] Arroyo A., A., Evaluación Técnica de Pavimentos Existentes de Asfalto según Método AASHTO 1993, Santiago, Chile; 1995
- [AASHTO, 1993] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Guide for Design of Pavements Structures, Washington, D.C., USA; 1993.
- [AASHTO, 1986] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Guide for Design of Pavements Structures - Volume 2 , Washington, D.C., USA; August 1986.
- [Darter, M.I., 1985] Darter M., I. et al, Concrete Pavement Evaluation System (COPEs), 2 volúmenes.
- [Dujisin, D., 1995] Dujisin Q. D. y Arroyo A. A., Desarrollo de una Relación Índice de Serviciabilidad (P)- Índice de Rugosidad Internacional (IRI), Santiago, Chile; 1995
- [Heukelom & Klomp, 1962] Heukelom, W. and Klomp G., Dynamic Testing as a means of Controlling Pavement during and after Construction, 1962
- [Forero, E., 1996] Forero B., E., Análisis del Método de Diseño AASHTO 1993 para Pavimentos de Hormigón Chilenos, Santiago, Chile; 1996
- [Hodges, Rolt & Jones, 1975] Hodges J. W., Rolt J. and Jones T. E., "The Kenya Road Transport Cost Study: Research on Road Deterioration", TRRL Laboratory Report 673, Crowthorne, U.K., 1975.
- [Klomp & Dormon, 1964] Klomp and Dormon G., Stress Distribution and Dynamic Testing in Relation to Road Design, 1964

- [LEN & Asociados, 1994] LEN y Asociados Ltda. - Ingenieros Consultores, Drenabilidad y Tiempo de Saturación para Bases de Pavimentos, Santiago, Chile; 1994.
- [Shell, 1978] Shell Pavement Design Manual, Shell International Petroleum Company - 1978
- [Taragin, A., 1958] Taragin A., Lateral Placements of Trucks in Two-Lane and Four-Lane divided Highways, 1958.

ANEXOS

- ANEXO 1:** CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS
- ANEXO 2:** EFECTO DEL INDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL
“ p_i “ EN LA DURABILIDAD DEL PAVIMENTO
- ANEXO 3:** DETERMINACION DEL VALOR DEL MODULO DE
RESILIENCIA DEL SUELO PARA SER USADO EN EL
METODO AASHTO - 1993
- ANEXO 4:** USO DEL CONO DE PENETRACION DINAMICO

ANEXO 1
CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

1.- CONSIDERACIONES GENERALES

El comportamiento de un pavimento está influenciado por una serie de factores, muchos de los cuales actúan según patrones que no pueden ser totalmente previstos en la etapa de diseño. Los valores que utiliza el proyectista no pasan de ser la “mejor estimación” posible, de manera que no existe la certeza que siempre se darán las condiciones previstas.

Con el propósito de disponer de una herramienta racional que permita evaluar las incertidumbres que se producen, en los diseños se utiliza la denominada teoría de Confiabilidad. Ella permite evaluar, en términos probabilísticos, el comportamiento de una obra durante el período para el cual debe prestar servicio.

En el diseño de pavimentos, la confiabilidad puede ser definida como la probabilidad que una determinada estructura se comporte, durante su vida útil, de acuerdo con lo previsto. Esta probabilidad es función de la variabilidad que suelen experimentar los factores que influyen en el comportamiento; solicitudes diferentes a las esperadas, variaciones en la calidad de la construcción o condiciones ambientales no previstas, entre otros, pueden modificar radicalmente la vida útil de un pavimento.

El nivel de confiabilidad que se adopte queda finalmente reflejado como un factor de seguridad, cuya magnitud depende del propio nivel de confianza elegido y de los errores combinados que se esperan para todos los factores que intervienen en el comportamiento del pavimento.

En la medida que aumenta el nivel de confiabilidad, crece la probabilidad que la obra se comporte igual o mejor que lo planificado. Ello implica, sin embargo, mayores inversiones iniciales, una disminución de los costos de conservación, así como menores costos de operación de los vehículos, debido al mejor estado en que se encontrará, en cada momento, la superficie de rodadura. Existe por lo tanto un compromiso entre los factores, lo que permite definir, para diferentes situaciones, un nivel de confiabilidad óptimo.

En los siguientes párrafos, se presenta un análisis de las premisas con las cuales AASHTO deduce los niveles de confiabilidad y los correspondientes factores de seguridad que recomienda, seguido de algunos cálculos que muestran cómo ellos variarían al aplicar las condiciones que más usualmente prevalecen en el país.

2.- CONFIABILIDAD OPTIMA DE DISEÑO

- El nivel de confiabilidad a adoptar en cada caso es un problema complejo y depende de factores técnico-económicos, que permiten determinar el valor presente o costo equivalente anual óptimo, considerando los costos iniciales o de construcción, los costos futuros correspondientes a mantención, costo de operación vehicular, tiempo de los usuarios, etc. En la figura N°1 se muestra esquemáticamente las tendencias que presentan normalmente los diversos factores involucrados en el análisis.

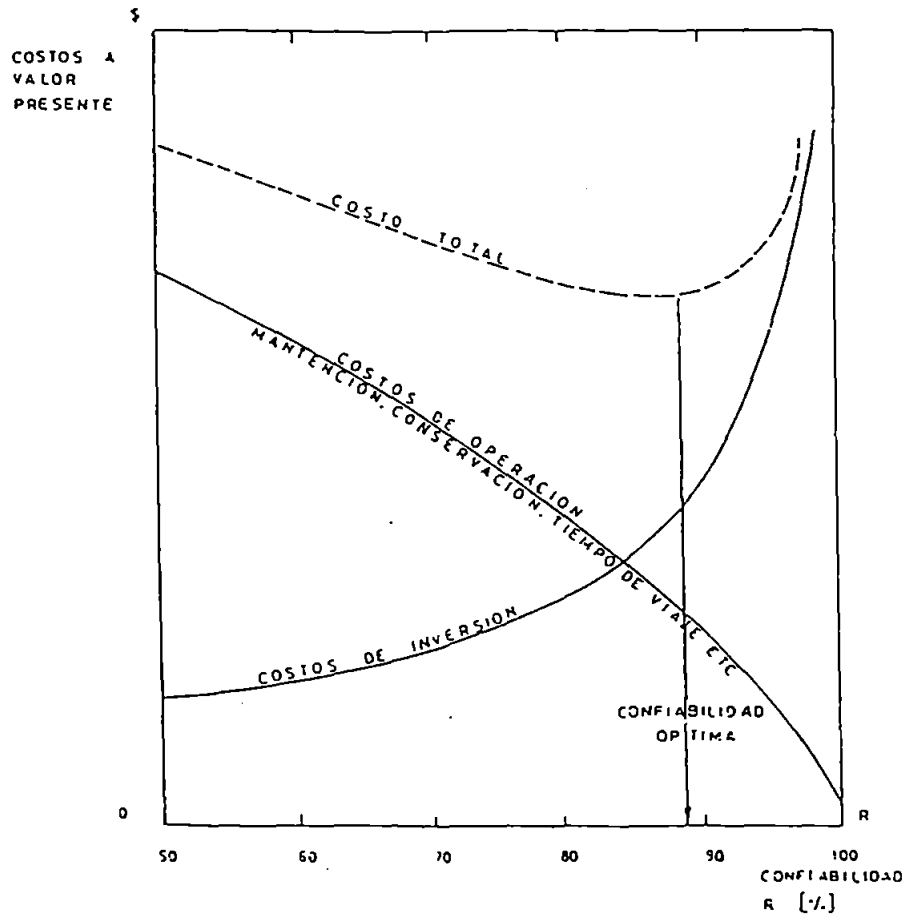


FIGURA 1 ILUSTRACION DEL NIVEL DE COFIABILIDAD OPTIMA

En las figuras 2, 3, 4 y 5 se presentan resultados de la confiabilidad óptima para dos estructuraciones en asfalto y dos en hormigón con cuatro diferentes niveles de tránsito solicitante y una tasa de descuento de 12% (* y **).

Las estructuraciones son las siguientes

	ESTRUCTURACION	
PAVIMENTO ASFÁLTICO	A-1	A-2
M. Resiliente subrasante (MPa)	55	150
Coefficiente de Drenaje	0.8	1.3

	ESTRUCTURACION	
PAVIMENTO DE HORMIGON	H-1	H-2
Resistencia equivalente [$**RE = \frac{Sc'}{J} Cd$] (MPa)	1509	1971
Módulo de reacción, K (MPa/m)	30	80

Del análisis de la información se puede concluir que :

- a.- Mientras mayor es el tránsito de diseño mayor es el nivel de confiabilidad óptimo.
- b.- Para los pavimentos asfálticos el nivel de confiabilidad óptimo es mayor cuando las condiciones de suelo y drenaje son desfavorables, para todos los niveles de tránsito solicitante.
- c.- En los pavimentos de hormigón el nivel de confiabilidad óptimo no está determinado por el suelo ni resistencia equivalente.

* Determinación del Nivel de Confiabilidad óptimo en el Diseño de Pavimentos de Asfalto - Memoria de Título U. de Chile 1989. Pedro Hidalgo.

** Determinación del Nivel de Confiabilidad óptimo en el Diseño de Pavimentos de Hormigón - Memoria de Título U. de Chile. Carlos Ruano.

3.- CONFIABILIDAD Y FACTOR DE SEGURIDAD

El nivel de confiabilidad, se traduce en un factor de seguridad aplicado al tránsito solicitante a través de la fórmula :

$$F.S. = 10^{-Z_R \times S_o} \text{ en la que}$$

S_o : Desviación normal de error combinado en la estimación del tráfico de diseño y el modelo de deterioro.

Z_R : Coeficiente estadístico correspondiente al nivel de confiabilidad adoptado.

El factor se expresa como :

$$S_o^2 = S_T^2 + S_n^2$$

S_T : Desviación asociada al tránsito solicitante

S_n : Desviación normal asociada al modelo de deterioro

Los valores medios típicos que recomienda AASHTO son:

$S_o = 0.35$, para Pavimento de Hormigón y

$S_o = 0.45$, para Pavimento de Asfalto

En las tablas incluidas en las páginas siguientes, se indican las proporciones dadas por AASHTO de los componentes de la desviación normal para pavimentos flexibles (asfálticos) y para pavimentos rígidos (hormigón). De ellos se desprende que el S_o correspondiente al tránsito tiene una preponderancia muy importante; en realidad AASHTO da a este parámetro un margen de error de ± 2.5 veces.

En ciertas circunstancias, en especial en las que suelen darse en el país, donde se proyecta con tasas de crecimiento muy altas, es posible que el error de estimación sea mucho menor que el supuesto por AASHTO. Así por ejemplo si se establece una

solicitud probable de 75×10^6 EE y aceptándose que el error máximo estará comprendido entre 100 y 50×10^6 EE, es decir $\pm 33\%$ se tendría :

Tránsito de diseño 75 millones de EE (estimación más probable)

Tránsito máximo en pista de diseño : $T_{\text{máx}} = 100$ millones EE

Tránsito mínimo en pista de diseño : $T_{\text{mín}} = 50$ millones EE

$$\begin{aligned} \log T_{\text{máx}} &= 8.0000 \\ \log T_{\text{mín}} &= \underline{7.6990} \\ \text{Diferencia} &= 0.3010 \end{aligned}$$

$$ST = \frac{0.3010}{4} = 0.0753$$

$$\begin{aligned} ST^2 &= 0.0057 \\ Sn^2 &= \underline{0.0902} \\ So^2 = ST^2 + Sn^2 &= 0.0959 ; \quad So = 0.31 \end{aligned}$$

Otro caso en que puede ajustarse el valor de So , ocurre en el caso de evaluar un pavimento recién ejecutado utilizando información real sobre el nivel de serviciabilidad inicial y número estructural. Por ejemplo, para un pavimento asfáltico ejecutado al cual se le ha determinado en forma precisa el valor del número estructural y su índice de serviciabilidad inicial, se puede ajustar el valor de So a:

$$Sn_1 = 0.04 \quad Sn_1^2 = 0.0016 \quad (\text{Por serviciabilidad inicial})$$

$$Sn_2 = 0.26 \quad Sn_2^2 = \underline{0.0676} \quad (\text{Por número estructural})$$

$$\Delta^2 Sn_{1-2} = 0.0692$$

$$So^2 = 0.2057 - 0.0692 = 0.1365 ; \quad So = 0.37$$

Por otra parte, si se supone que el límite superior de tránsito corresponde a 100 Millones de EE en la pista de diseño, la desviación normal puede adoptar los siguientes valores :

TRÁNSITO DE DISEÑO (MILLONES DE EE)	VALOR DE So	
	ASFALTO	HORMIGON
≤40	0.45	0.35
50	0.43	0.33
60	0.42	0.32
70	0.41	0.31
≥80	0.40	0.30

4.- NIVEL DE CONFIABILIDAD Y FACTORES DE SEGURIDAD RECOMENDADOS

A.- PAVIMENTO DE ASFALTO

Tránsito Solicitante en Pista Diseño (Mill. EE)	Nivel de Confiab. R% (*)	Factor ZR	Factor So	F.S.
≤5	50 - 60	0.000 - 0.253	0.45	1.00 - 1.30
5 a 15	50 - 70	0.000 - 0.524	0.45	1.00 - 1.72
15 a 30	60 - 75	0.253 - 0.674	0.45	1.26 - 2.01
30 a 50	70 - 80	0.524 - 0.841	0.44	1.70 - 2.34
50 a 70	70 - 85	0.524 - 1.037	0.42	1.66 - 2.73
70 a 90	70 - 90	0.524 - 1.282	0.40	1.62 - 3.26

(*) Usar el mayor valor del rango para suelos deficientes y mala calidad de drenaje.

B.- PAVIMENTO DE HORMIGON

Tránsito Solicitante en Pista Diseño (Mill. EE)	Nivel de Confiab. R% (*)	Factor ZR	Factor So	F.S.
≤5	50	0.000	0.35	1.00
5 a 15	50 - 60	0.000 - 0.253	0.35	1.00 - 1.23
15 a 30	60 - 70	0.253 - 0.524	0.35	1.23 - 1.83
30 a 50	70 - 75	0.524 - 0.674	0.34	1.51 - 1.70
50 a 70	75 - 80	0.674 - 0.841	0.32	1.64 - 1.86
70 a 90	80 - 85	0.841 - 1.037	0.30	1.79 - 2.05

Figura 2

RELACIÓN COSTO SOCIAL PRESENTE - NIVEL DE CONFIABILIDAD
ASFALTO

DATOS BÁSICOS

M. RESILIENTE DE SUBRASANTE $M_r = 55 \text{ Mpa}$

COEFICIENTE DE DRENAJE $C = 0.8$

TRÁNSITO : A : 50 Millones EE
 B : 25 Millones EE
 C : 10 Millones EE
 D : 2.5 Millones EE

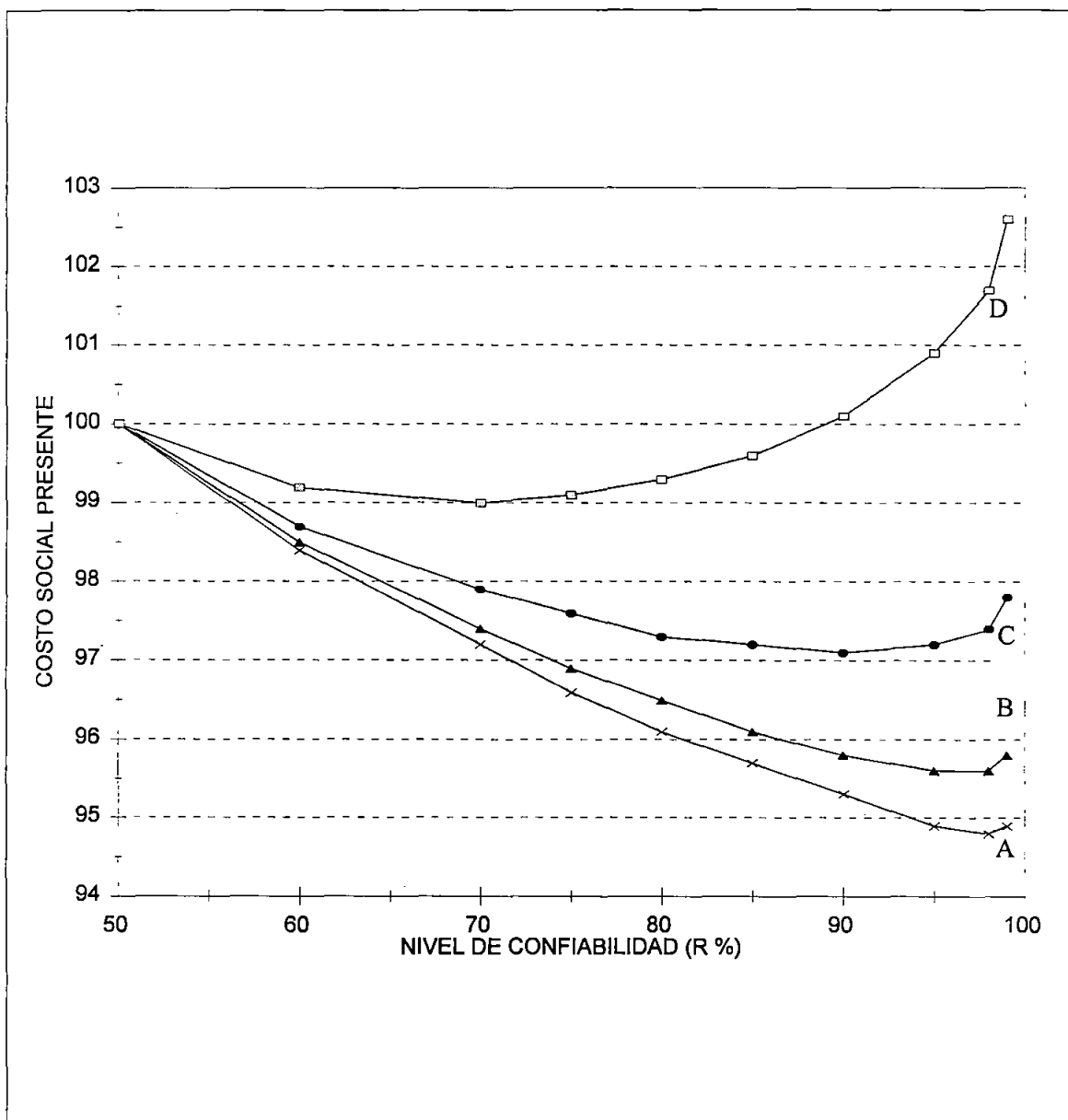


Figura 3

RELACIÓN COSTO SOCIAL PRESENTE - NIVEL DE CONFIABILIDAD
ASFALTO

DATOS BÁSICOS

M. RESILIENTE DE SUBRASANTE $M_r = 150 \text{ Mpa}$

COEFICIENTE DE DRENAJE $C = 1.3$

TRÁNSITO : A : 50 Millones EE
 B : 25 Millones EE
 C : 10 Millones EE
 D : 2.5 Millones EE

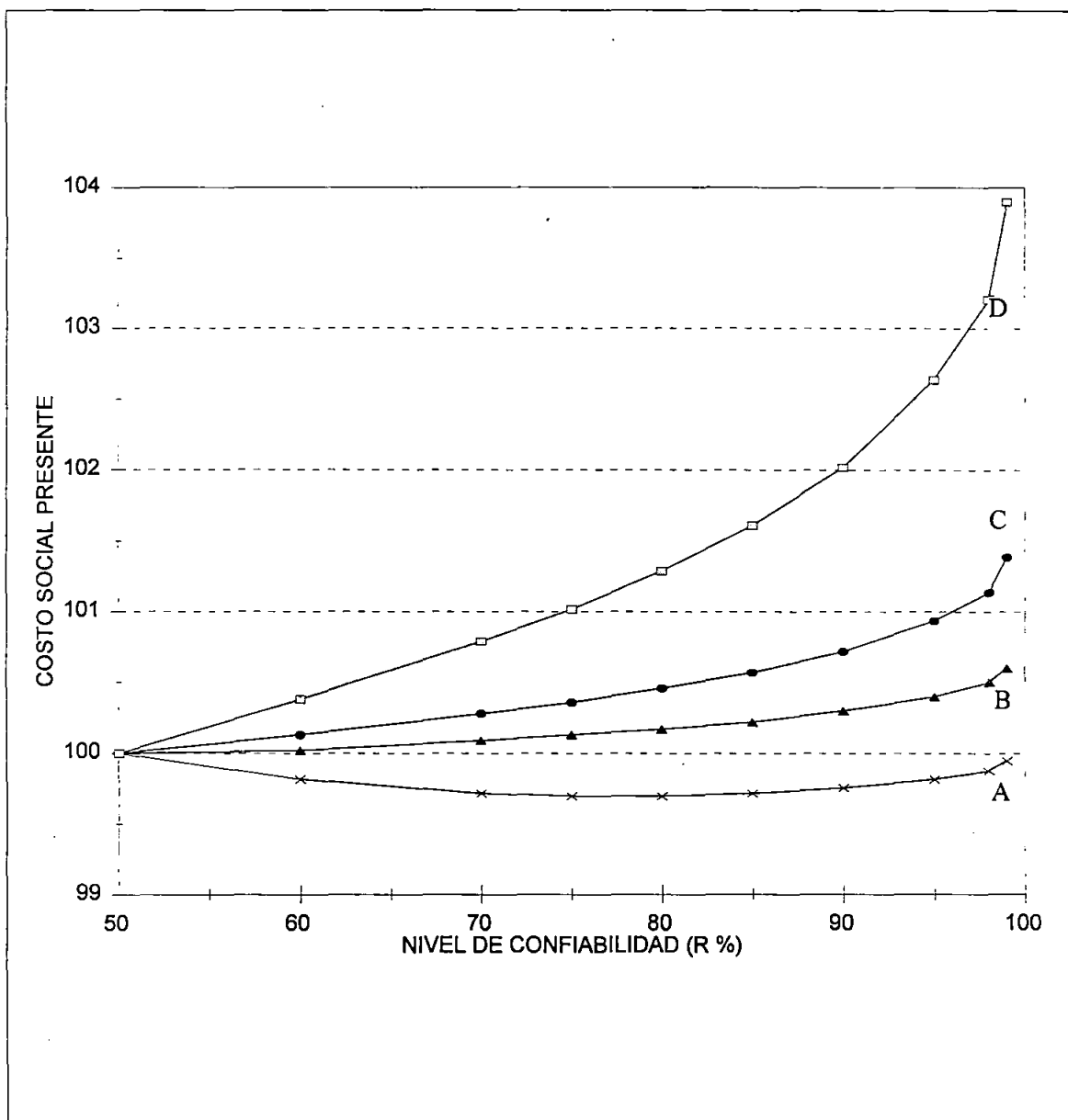


Figura 4

RELACIÓN COSTO SOCIAL PRESENTE - NIVEL DE CONFIABILIDAD
HORMIGÓN

DATOS BÁSICOS

RESISTENCIA EQUIVALENTE $RE = \frac{R_d * C_d}{J} = 1.509$

M. REACCIÓN DE SUBRASANTE $k = 30 \text{ Mpa/m}$

TRÁNSITO :

A :	50 Millones
B :	25 Millones
C :	10 Millones
D :	2.5 Millones

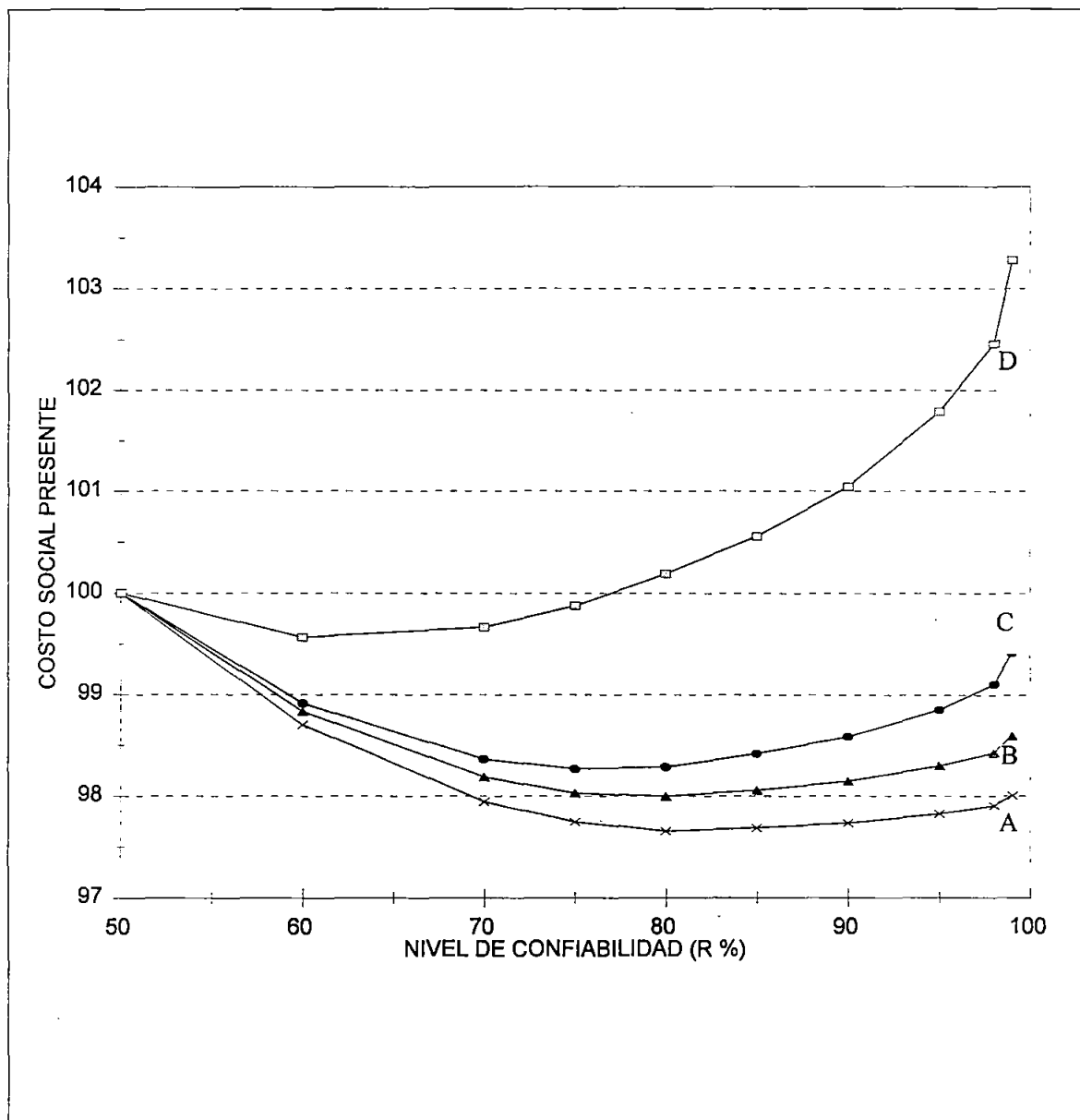


Figura 5

RELACIÓN COSTO SOCIAL PRESENTE - NIVEL DE CONFIABILIDAD
HORMIGÓN

DATOS BÁSICOS

RESISTENCIA EQUIVALENTE

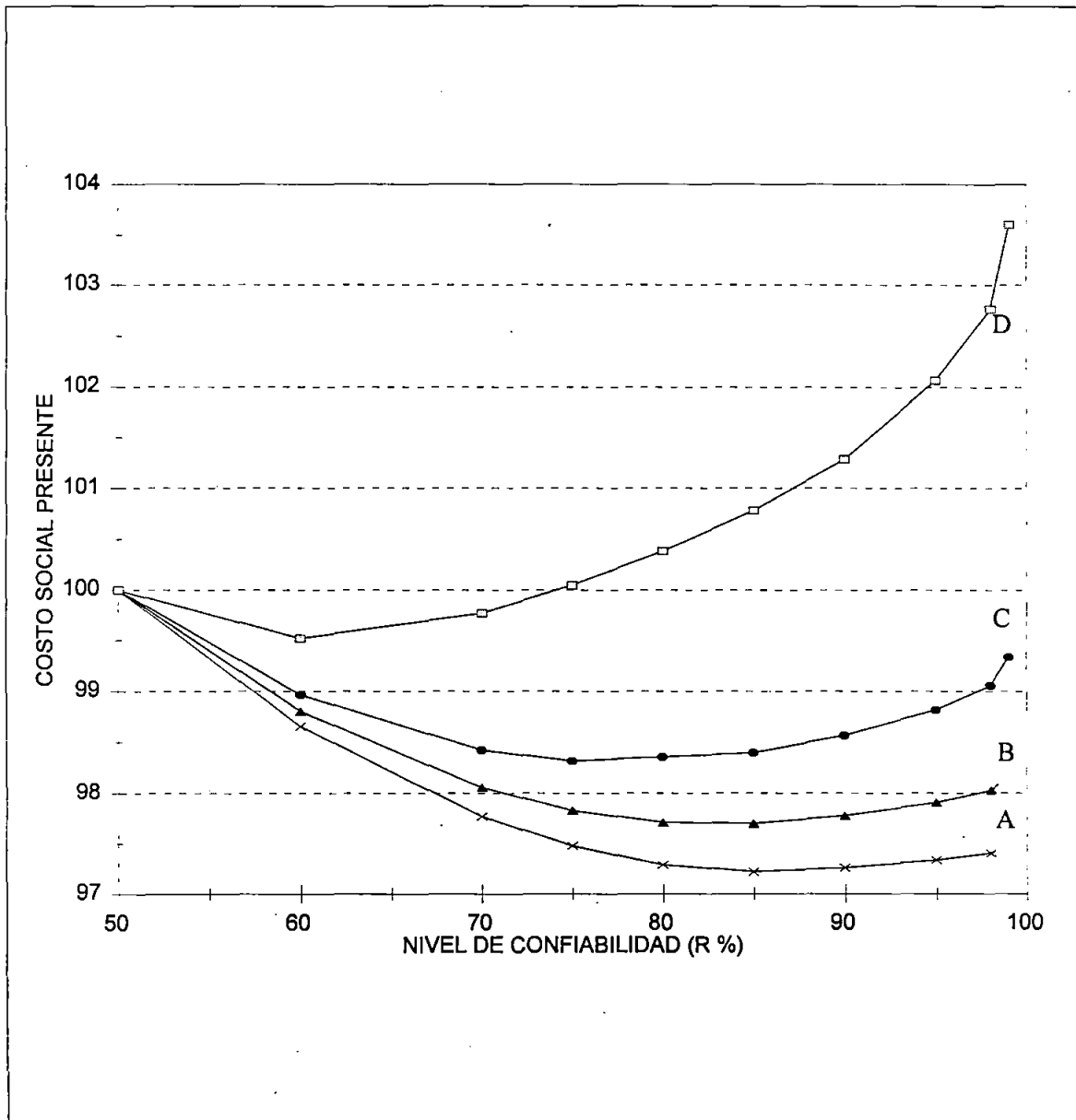
$$RE = \frac{R_d * C_d}{J} = 1.971$$

M. REACCIÓN DE SUBRASANTE

k = 80 Mpa/m

TRÁNSITO :

- A : 50 Millones
- B : 25 Millones
- C : 10 Millones
- D : 2.5 Millones



ANEXO 2

EFECTO DEL INDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL

“ p_i “ EN LA DURABILIDAD DEL PAVIMENTO

EFECTO DEL ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (p_i) EN LA DURABILIDAD DEL PAVIMENTO

La calidad de construcción de un pavimento tiene incidencia en la vida de diseño y por tanto, modifica la oportunidad de intervenir (rehabilitación o reconstrucción).

Para evaluar este efecto, se estableció la diferencia, cuantificada en ejes equivalentes admisibles, para pavimentos asfálticos y de hormigón, en porcentaje del tráfico para una serviciabilidad inicial de referencia, $p_i = 4.2$. El índice de serviciabilidad final fue, $p_f = 2.5$

Se consideraron dos categorías en cuanto a la calidad de la subrasante y tres niveles de tránsito solicitante.

- Pavimentos Flexibles

Se eligieron los valores de parámetros fijos que aparecen en Tabla 1.

Tabla 1

Curva Nº	Z_R	So	MR(MPa)	EE Millones
1	0.674	0.45	40	50
2				25
3				10
4			150	50
5				25
6				10

Usando la fórmula de diseño AASHTO se calculó el NE necesario para $p_i = 4.2$ y tránsito base elegido (ej: 10×10^6 EE); introduciendo ese NE como constante se calcularon los EE admisibles haciendo variar el p_i entre 3.8 y 4.8; los resultados de los EE se expresaron como un porcentaje de los EE para $p_i = 4.2$. Se calcularon las curvas de regresión del porcentaje de variación de los EE en función del p_i para cada combinación de la Tabla 1. Los resultados se muestran en Figura 1.

Las relaciones obtenidas fueron lineales, de la forma:

$$EE = a + b \times p_i$$

Las relaciones obtenidas varían para el tránsito solicitante y el módulo resiliente (MR)

- **Pavimento Rígido**

Se eligieron los valores de los parámetros fijos que aparecen en Tabla 2

Tabla 2

Z_R	S_o	E (MPa)	R_m (MPa)	J	K (MPa/m)	EE Millones
0.674	0.35	35.000	4.8	3.2	40	10
						25
				3.8	80	50
						10
						25
						50

Usando la fórmula de diseño AASHTO se calculó el espesor H necesario para cada tránsito de diseño base (ej.: 10×10^6 EE), usando un $p_i = 4.2$; introduciendo ese espesor H como constante se calcularon los EE admisibles haciendo variar el p_i entre 3.8 y 4.8; los EE calculados se expresaron como porcentajes del tránsito de referencia a $p_i = 4.2$. La relación encontrada en la regresión fue una ecuación única del tipo:

$$EE = a + b \times p_i$$

La ecuación se muestra independiente del nivel de tránsito solicitante y del módulo de reacción de la subrasante (K) y del coeficiente de transmisión de cargas (J).

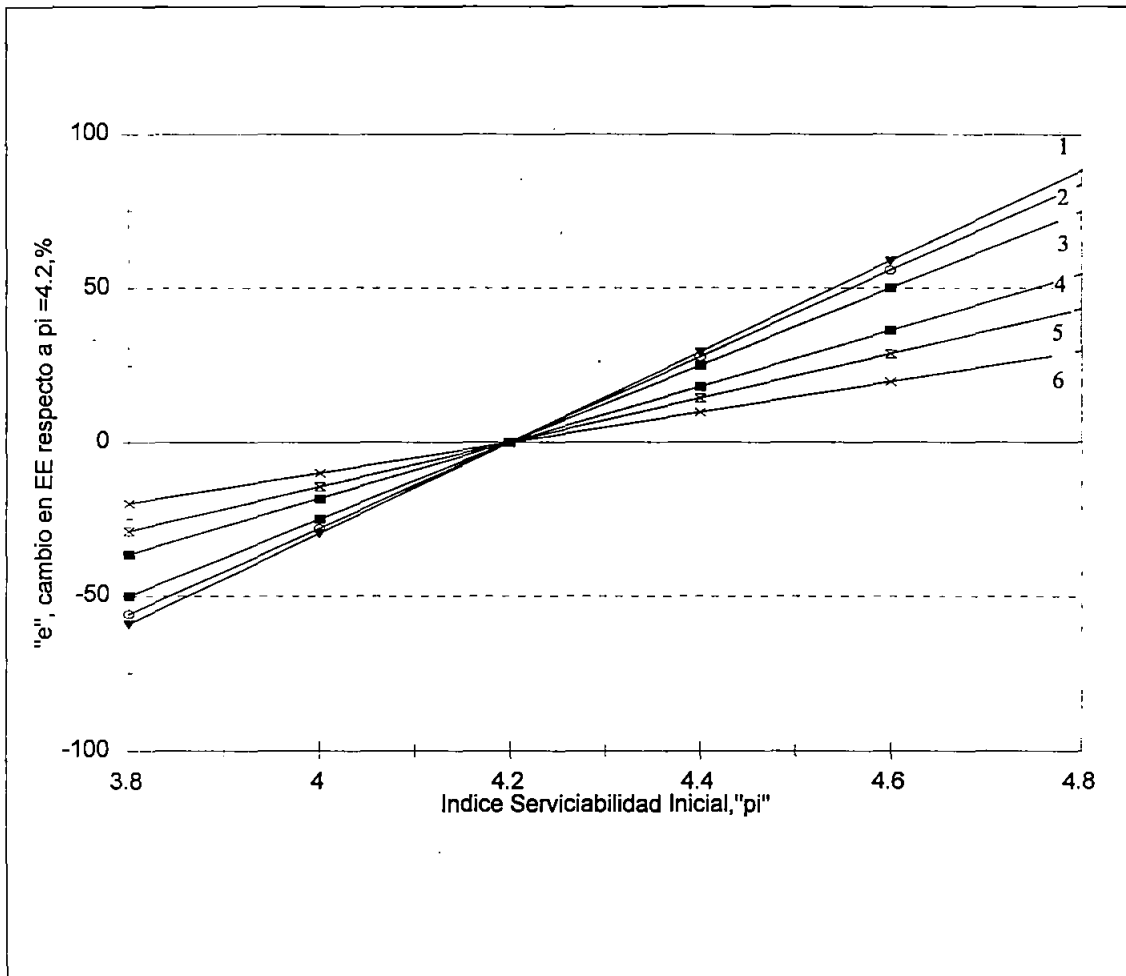
Los resultados se muestran en Figura 2.

Figura 1

PAVIMENTO DE ASFALTO

DISEÑO AASHTO - 93

Cambio en EE para un "pi" de Referencia = 4.2



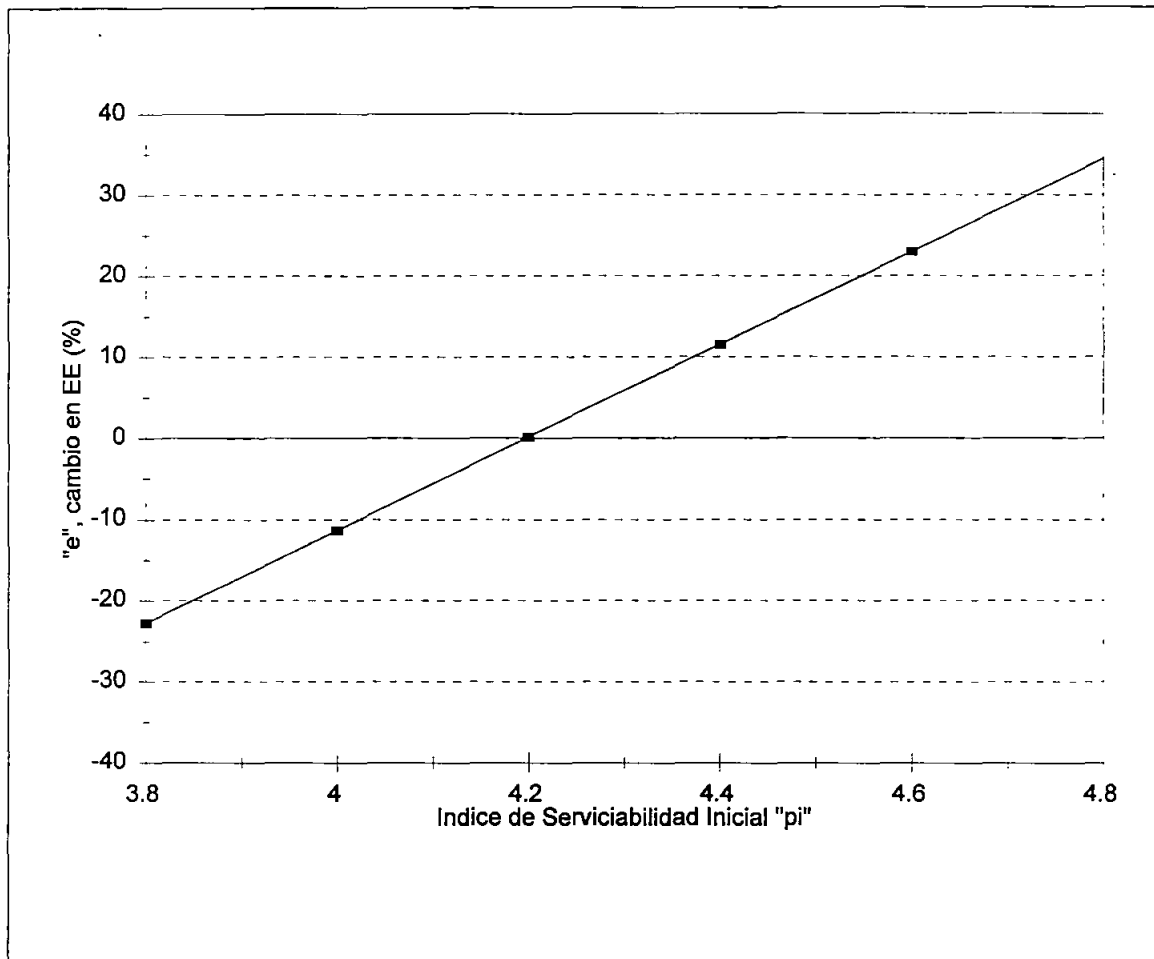
CURVA N°	ZR	So	Mr Mpa	EE millones	Ecuación	R ²
1				50	$e = 125 \cdot pi - 525$	0.986
2	0.674	0.45	40	25	$e = 139.58 \cdot pi - 586.236$	0.980
10				$e = 147.41 \cdot pi - 619.122$	0.977	
50				$e = 91.012 \cdot pi - 382.25$	0.996	
4	0.674	0.45	150	25	$e = 72.352 \cdot pi - 303.878$	0.999
10				$e = 49.634 \cdot pi - 208.463$	0.999	

Figura 2

PAVIMENTO DE HORMIGÓN

DISEÑO AASHTO - 93

Cambio en EE para un "pi" de Referencia = 4.2



CURVA N°	ZR	So	J	K Mpa/m	EE millones	Ecuación	R ²
1	0.674	0.35	3.2	40	10 25 50	$e = -240.1 + 57.2 \cdot pi$	0.9996
	0.674	0.45	3.8	80	10 25 50		

ANEXO 3

DETERMINACION DEL VALOR DEL MODULO DE RESILIENCIA DEL SUELO PARA SER USADO EN EL METODO AASHTO - 1993

DETERMINACION DEL VALOR MEDIO DEL MODULO DE RESILIENCIA DEL SUELO PARA SER USADO EN EL METODO AASHTO - 93

De acuerdo al Método AASHTO de 1993, el parámetro que caracteriza el suelo de sub-rasante, es el valor medio del módulo resiliente de dicho suelo, debiendo cumplirse con un coeficiente de variación (C.V.) \leq a 15%.

Para obtener este valor medio, se deberá en primera instancia, revisar los valores individuales, definiendo las sectorizaciones que sean pertinentes.

Una vez realizada la sectorización, en cada sector se determinará el valor medio del módulo de resiliencia medido en MPa, cuidando que el coeficiente de variación se mantenga \leq a 15%. Para ello, se propone la siguiente metodología.

- 1.- Se calcula la media, la dispersión y el coeficiente de variación para el conjunto de todos los valores individuales, dentro del sector considerado.
- 2.- Si se obtiene C.V. $>$ 15%, se reemplaza el mayor valor individual del Modulo de Resilencia por un valor igual al valor mayor menos 1 MPa.
- 3.- Se calcula ahora la media, la dispersión y el coeficiente de variación para el nuevo conjunto de valores.
- 4.- Si todavía se obtiene un C.V. $>$ 15%, se reemplaza el valor mayor por un valor igual al valor mayor menos 1 MPa.
- 5.- Se continua la iteración, disminuyendo en igual forma los valores mayores, hasta obtener un coeficiente de variación igual al 15%.

NOTA : Es posible, si se presentan valores muy pequeños aislados, especificar un reemplazo de material en la zona afectada, procediéndose en este caso a considerar en la estadística el valor del módulo correspondiente al material de reemplazo en vez de los originalmente determinados en la prospección dentro de dicha zona.

En el cuadro siguiente se muestra un ejemplo de cálculo del valor medio del módulo de resiliencia, de acuerdo a la metodología expuesta.

**DETERMINACION DEL VALOR MEDIO
DEL MODULO DE RESILIENCIA DEL SUELO**

Muestra	(1) Mr	(2) Mr	(3) Mr		(4) Mr	(5) Mr
1	67	67	67	.....	49	48
2	43	43	43	.....	43	43
3	49	49	49	.....	49	48
4	98	98	97	.....	49	48
5	27	27	27	.....	27	27
6	36	36	36	.....	36	36
7	43	43	43	.....	43	43
8	67	67	67	.....	49	48
9	77	77	77	.....	49	48
10	49	49	49	.....	49	48
11	99	98	97	.....	49	48
12	98	98	97	.....	49	48
Media	63	63	62	.....	45	44
Desviación	25.57	25.44	25.06	.....	7.01	6.61
C.V.	0.41	0.41	0.40	.....	0.16	0.15
N	12	12	12	.....	12	12

(1) Valores correspondiente a todas las muestras (C.V. = 0.41)

(2) Iteración N°1. Se reemplazó el valor 99 por 98. Se obtiene C.V. = 0.41

(3) Iteración N°2. Se reemplazaron los valores 98 por 97. Se obtiene C.V. = 0.40

.....
(4) Iteración N° n-1. El valor de reemplazo alcanzó a 49. Se obtiene C.V. = 0.16

(5) Iteración N° n. El valor de reemplazo alcanzó a 48. Se obtiene C.V. = 0.15

ANEXO 4

USO DEL CONO DE PENETRACION DINAMICO

CONO DE PENETRACION DINAMICA (CPD)

1.- USO DEL INSTRUMENTO

El Cono de Penetración Dinámico (CPD) es un instrumento diseñado para medir in situ las propiedades estructurales de pavimentos de carreteras existentes con materiales granulares no ligados incluyendo el suelo de la subrasante. (Figura N°1). Esto también se puede lograr con el ensayo CBR de terreno; pero este ensayo es notablemente más complicado, caro y lento comparado con el CPD.

Por otra parte si bien el CBR de laboratorio es un ensayo fácil de ejecutar, él no mide la resistencia real del suelo in situ ya que el ensayo se ejecuta sobre una muestra alterada en que se ha destruido y modificado la estructura del suelo natural.

El CPD es un ensayo fácil de ejecutar que permite medidas continuas. Puede alcanzar hasta una profundidad de 800 mm, o hasta 1200 mm cuando se usa una barra de extensión.

El principio en que se basa el CPD guarda relación con la velocidad de penetración del cono cuando se hince con una fuerza normalizada; ella es inversamente proporcional a la resistencia del material, (existe una relación entre la penetración medida en golpes/mm con el CPD y el CBR). Las Figuras N° 2a y N° 2b muestran varias relaciones.

Cuando los estratos del suelo o pavimento tienen diferentes resistencias se pueden identificar los límites y determinar los espesores. Un resultado típico se muestra en la Figura N°3.

PENETROMETRO DINAMICO DE CONO PORTATIL

(DIBUJO NO A ESCALA)

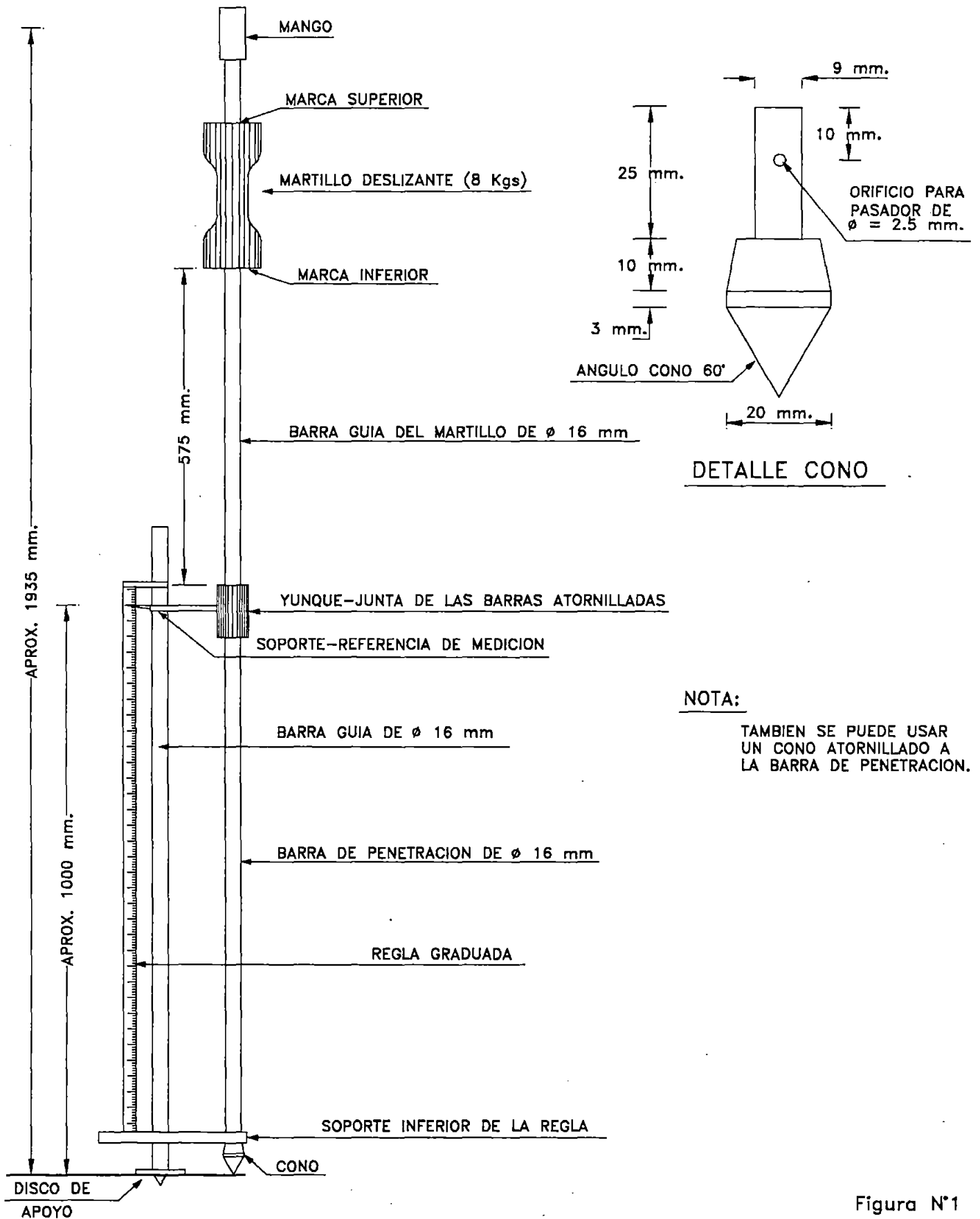


Figura N°1

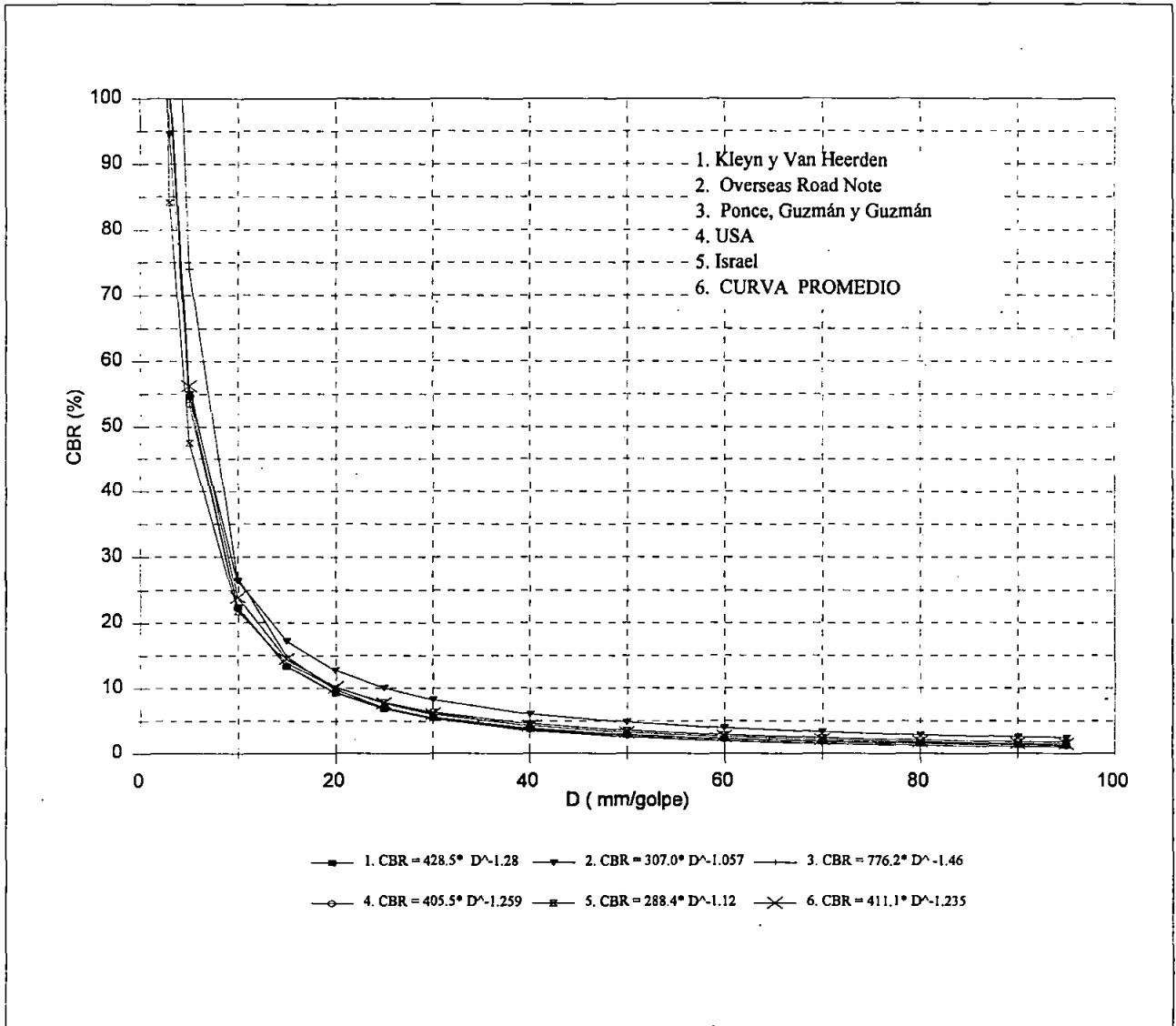


Fig 2a RELACIONES ENTRE PENETRACION Y CBR

Peso de la masa: 8 Kg
 Altura de la caída: 57.5 cm
 Diámetro del Cono: 2.0 cm
 Ángulo en la punta del cono: 60°

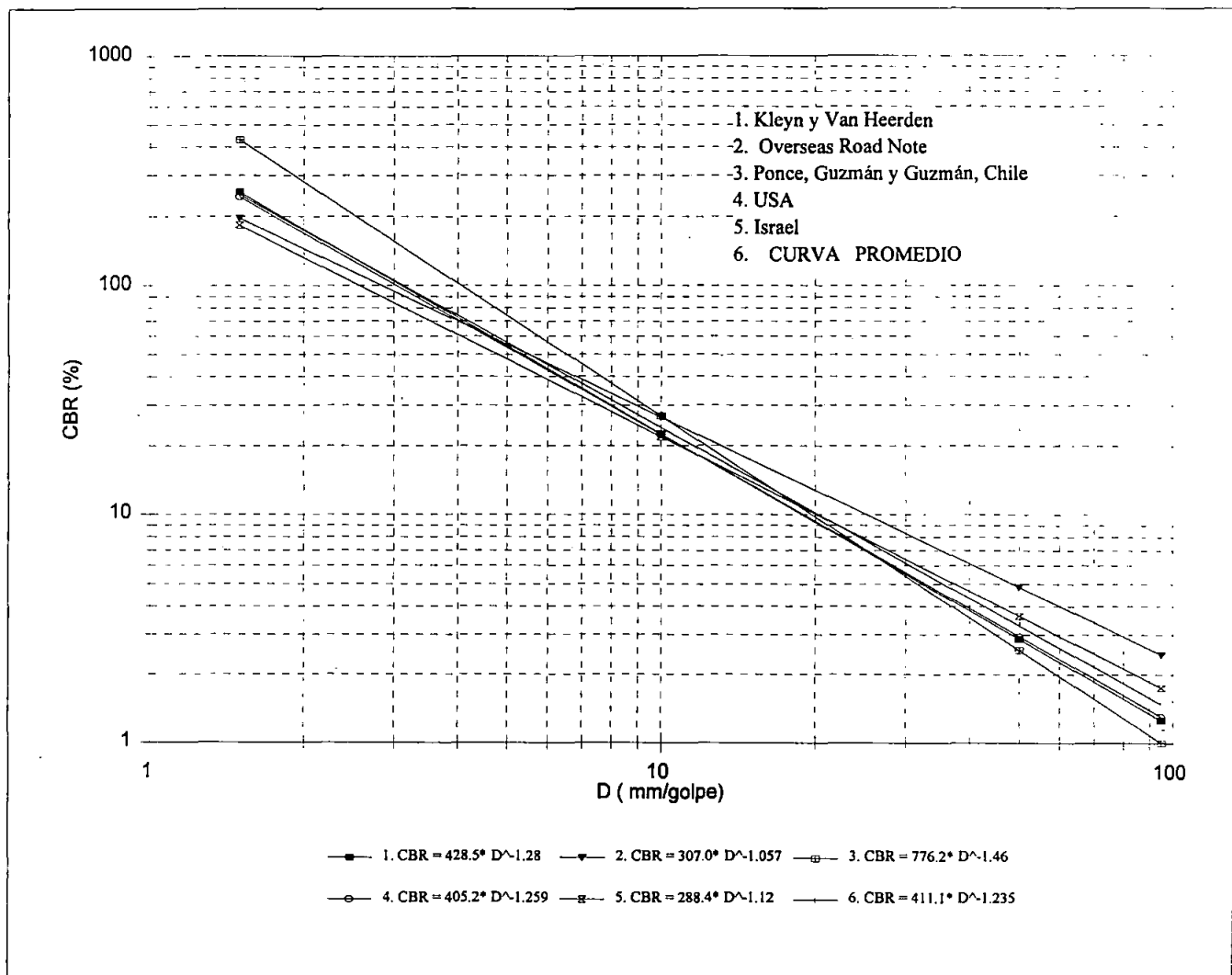


Fig 2b RELACIONES ENTRE PENETRACION Y CBR

Peso de la masa: 8 Kg
 Altura de la caída: 57.5 cm
 Diámetro del Cono: 2.0 cm
 Ángulo en la punta del cono: 60°

N-NUMERO DE GOLPES ACUMULADOS

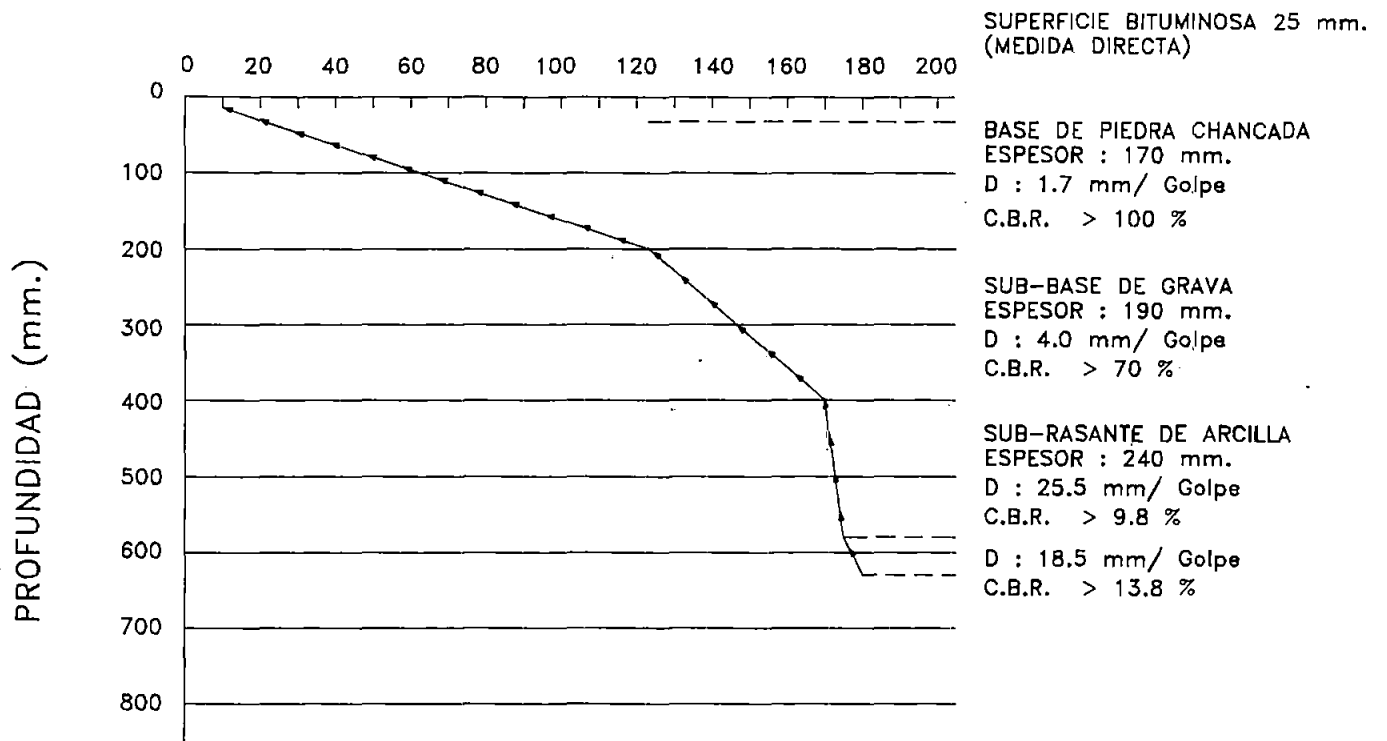


FIG N° 3 RESULTADO DE UN ENSAYO DE CONO DE PENETRACION DINAMICO.

NOTA:

D = PENDIENTE EN "mm/golpe".

2.- CARACTERISTICAS DEL INSTRUMENTO.

El Cono de Penetración Dinámico consiste de una barra de acero de 16 mm de diámetro de un largo aproximado de 950 mm (permite una extensión de 400 mm) con un cono de 20 mm de diámetro en el extremo. El ángulo de ataque del cono es de 60°. Esta barra penetra en el suelo mediante golpes, para lo cual se atornilla a un yunque.

Sobre el yunque se atornilla otra barra de 16 mm de diámetro por lo cual se desplaza un martillo de 8 kg de peso; el largo de la barra permite que la altura de caída del martillo sea de 575 mm.

El instrumento puede tener un tope en el extremo superior que limite la subida a 575 mm; éste hace las veces de mango para sostener el instrumento en posición durante el ensayo, o también sólo un mango superior, y marcas en la barra para determinar la altura de caída.

En la última forma se elimina la posibilidad que el martillo pueda producir fuerzas en sentido contrario a la penetración.

Las medidas se hacen con respecto a una regla graduada de referencia que se fija a una barra que en su extremo tiene una punta aguda que se clava al suelo y queda en posición fija.

El dispositivo con la regla permite deslizar a la barra de penetración en la parte inferior y en la parte superior va adosada al yunque que se desliza sobre el dispositivo con la regla de referencia donde se va midiendo la penetración.

El largo aproximado del equipo es de 1935 mm.

Al dispositivo que sostiene la regla de medida se le puede fijar un nivel esférico de burbuja o una plomada para controlar la verticalidad del instrumento.

Se recomienda usar conos adosados a la barra mediante un pasador por las siguientes razones:

- Cuando se penetran estructuras de pavimentos no muy fuertes se puede usar el pasador y recuperar el cono.
- Si se penetran estructuras de pavimentos fuertes y se espera que la recuperación será lenta se usa el cono sin pasador y se deja perdido. El tiempo que se ahorra compensa el costo del cono.
- Los conos con hilo tienden a dañar la unión, necesitan de llaves de tubo para apretarlos, las que con el tiempo dañan la barra de penetración. Además la manipulación consume mucho tiempo.

3.- OPERACION DEL INSTRUMENTO

- 3.1 Para ensayos sobre el terreno natural, remover la capa superior del suelo (20 a 30 cm). Preparar la superficie dejándola lo más horizontal posible.
- 3.2 Fijar el instrumento hundiendo el dispositivo con la reglilla en la superficie preparada.
- 3.3 Colocar el instrumento lo más vertical posible usando un nivel de burbuja o una plomada, sujetándolo por el dispositivo con la reglilla.
- 3.4 Un segundo operador usando un banquillo de madera sube el martillo deslizante hasta la marca superior, y después lo deja caer libremente sobre el yunque.
- 3.5 Un tercer operador lleva el registro de la penetración lograda en mm versus el número de golpes, para lo cual se le debe proveer de una planilla adecuada como la que se encuentra al final del anexo.

- 3.6 Durante el ensayo se debe tener presente lo siguiente : Mantener un ritmo regular al ensayar, evitando detenciones excesivas.
- 3.7 Si el instrumento se sale de la vertical, no debe corregirse la posición, ya que el contacto de la barra con los costados del hoyo alteran los resultados.
- 3.8 Cuando el ángulo de inclinación del instrumento se hace mayor de 3° , haciendo que el martillo deslice sobre la barra y no cae libremente, el ensayo debe abandonarse, tomando nota de las condiciones cuando se suspendió el ensayo.
Si se usa una plomada adosada a la regla de medición; está no debe desplazarse más de 5 cm de la vertical.
- 3.9 Se debe anotar la lectura inicial y registrar la lectura en milímetros después de cada golpe en la ficha correspondiente.

4.- INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Se han desarrollado algunos conceptos simples que ayudan a la interpretación de los resultados.

4.1 Curva del CPD.

Es la representación del progreso del ensayo ejecutado en una estructura de pavimento o en un suelo. En coordenadas se indica la profundidad y en abscisas el número acumulado de golpes para dichas profundidades. La Figura N°3 se muestra un ejemplo de esto.

4.2 Índice de Penetración o número D.

El número D corresponde al avance, en mm, de penetración por golpe de un determinado suelo. En la Tabla N°1 se muestran algunos valores típicos de D (mm/golpe) para distintos materiales.

Tabla N°1

Material	mm/golpe
Base de Piedra Chancada	1.7
Sub-base de grava	4.0
Subrasante de Arcilla	25.5

La información de D (mm/golpe) se puede representar en función de la profundidad. Un ejemplo se muestra en la figura N°4, el que se denomina Diagrama Estructural.

4.3 Número Estructural (NE).

Es el número de golpes para penetrar hasta una profundidad determinada. Por ejemplo NE 800 es el número total de golpes para llegar a 800 mm desde la superficie.

4.4 Curva de Balance Estructural (NP_Z)

También se puede expresar la resistencia a la penetración a distintas profundidades como un porcentaje del número de golpes necesario para penetrar hasta la profundidad evaluada. Por ejemplo :

$$NP_Z = \frac{GNB_Z}{NE_i} \times 100 \quad (\%)$$

NUMERO "D" (Penetración en mm / Golpe)

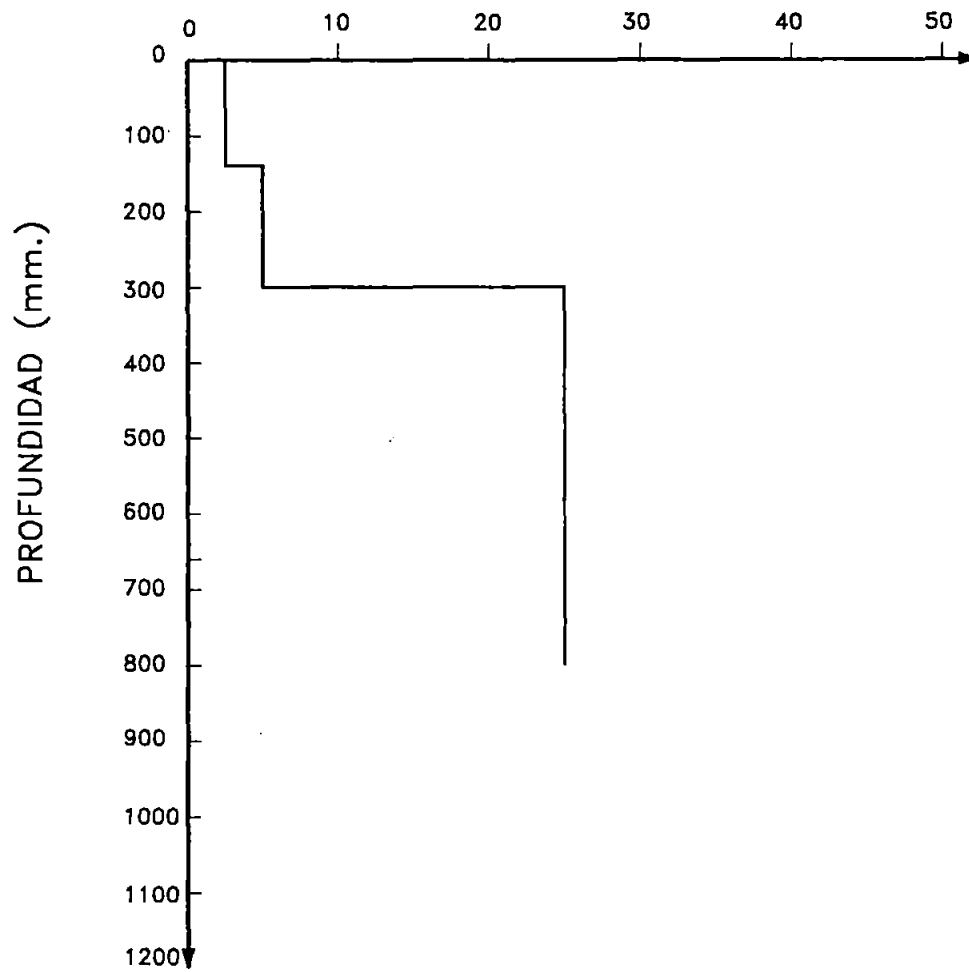


FIG N° 4 DIAGRAMA ESTRUCTURAL

donde

NP_Z = resistencia a la penetración para profundidad Z (%)

GNB_Z = número de golpes requeridos para penetrar hasta Z.

NE_i = número de golpes para penetrar hasta la penetración total evaluada.

Un ejemplo de una curva de Balance Estructural se muestra en Figura N°5.

NP_Z representa el aporte estructural de los materiales hasta la profundidad Z respecto a la capacidad estructural total medida.

5.- CORRELACIONES DE LAS MEDIDAS DE PENETRACION DEL CONO CON CBR IN SITU.

Se han examinado una serie de curvas de correlación entre la penetración del Cono Dinámico y el CBR in situ.

Las expresiones son del tipo :

$$CBR = \frac{A}{D^B} \quad (\%)$$

CBR = Razón Soporte California (%)

D = Penetración (mm/golpe)

A,B = Constantes

Después de analizar 5 correlaciones entre la penetración del Cono Dinámico y el CBR in situ, incluida la correlación establecida por Ponce, Guzmán y Guzmán en Chile, se propone usar una fórmula que considere los promedios de las constantes A y B.

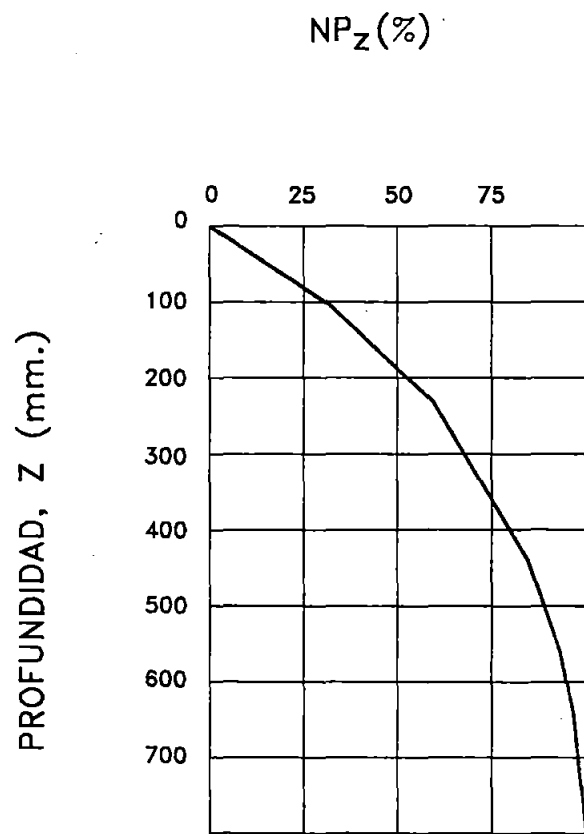


FIG N° 5 CURVA DE BALANCE ESTRUCTRAL

La fórmula propuesta es la siguiente :

$$\text{CBR} = \frac{411,1}{D^{1,235}} \quad (\%)$$

Examinando las distintas curvas se nota que ellas dan valores muy similares en el rango de valores de CBR < 15%.

Ver Figura N° 2 a.

ASISTEC S.A.		CONO DE PENETRACION DINAMICO													
SANTIAGO CHILE		PROYECTO:													
		CALZADA:							PISTA:						
		CALICATA:													
FECHA:		KILOMETRO:													
OPERADOR:		TIEMPO:													
0=		DATOS DEL ENSAYO													
Golpe (No.)	Lectura (mm)	Golpe (No.)	Lectura (mm)	Golpe (No.)	Lectura (mm)	Golpe (No.)	Lectura (mm)	Golpe (No.)	Lectura (mm)	Golpe (No.)	Lectura (mm)	Golpe (No.)	Lectura (mm)	Golpe (No.)	Lectura (mm)
1		26		51		76		101		126		151		176	
2		27		52		77		102		127		152		177	
3		28		53		78		103		128		153		178	
4		29		54		79		104		129		154		179	
5		30		55		80		105		130		155		180	
6		31		56		81		106		131		156		181	
7		32		57		82		107		132		157		182	
8		33		58		83		108		133		158		183	
9		34		59		84		109		134		159		184	
10		35		60		85		110		135		160		185	
11		36		61		86		111		136		161		186	
12		37		62		87		112		137		162		187	
13		38		63		88		113		138		163		188	
14		39		64		89		114		139		164		189	
15		40		65		90		115		140		165		190	
16		41		66		91		116		141		166		191	
17		42		67		92		117		142		167		192	
18		43		68		93		118		143		168		193	
19		44		69		94		119		144		169		194	
20		45		70		95		120		145		170		195	
21		46		71		96		121		146		171		196	
22		47		72		97		122		147		172		197	
23		48		73		98		123		148		173		198	
24		49		74		99		124		149		174		199	
25		50		75		100		125		150		175		200	

OBSERVACIONES:

ESTIMACIÓN DE S_o EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

Componentes de la Varianza del diseño- comportamiento	Variables que afectan el diseño y comportamiento de pavimentos flexibles					Estimadores de la variab. del comportamiento		Distribución de las Estimadas Varianzas	
	Variables	Subvariables	Factores Específicos de Diseño			Desviación Estándar	Varianza	% del Total	% del Total
			Nombre	Símbolo	Unidades	S	S ²		
S²nrf	Factores de diseño del pavimento que aparecen en la ecuación de diseño	Nivel de habilidad de servicio del pavimento	Indice de Serv. Inicial	P1		0.04	0.0014	0.7	1.5
			Indice de Serv. Final	Pt					
		Estructura de Pavimento sobre la subrasante	Factor de resistencia superficial	a1		0.11	0.0124	6.0	13.7
			Espesor Superf.	D1	in	0.11	0.0127	6.2	13.9
			Factor de resistencia base	a2		0.10	0.0104	5.1	11.5
			Factor drenaje base	m2		0.07	0.0051	2.5	5.6
			Espesor base	D2	in	0.07	0.0051	2.5	5.6
			Factor de resistencia subbase	a3		0.12	0.0143	6.9	15.7
			Factor drenaje subbas	m3		0.07	0.0050	2.4	5.5
			Espesor subbase	D3	in	0.07	0.0050	2.4	5.5
		Subrasante	Número Estructural	SN	in	0.26	0.0699	34.0	77.0
	Módulo Resiliente Subrasante	Mr	psi	0.14	0.0195	9.5	21.5		
				0.30	0.0908	44.1	100.0		
S²nru	Todas las variables no identificadas que contribuyen al cambio en el comportamiento				0.10	0.0097	4.7		
S²nr = S²nrf+S²nru	Todos los factores y variables que contribuyen en el comportamiento de secciones con el mismo diseño y tránsito				0.32	0.1005	48.9		
S²WLd	Componentes que incluyen formas matemáticas, derivación de ctes. de ecuaciones, etc.								
S²WL = SUM (S²WLd)	Todos los factores que contribuyen a desviaciones entre el tránsito predicho y el comportamiento medio				0.26	0.0652	31.7		
S²n = S²nr + S²WL	Todos los factores y variables que contribuyen a la variación en el comportamiento del pavimento por efecto de la predicción del tránsito				0.41	0.1657	80.6		
S²w = S²wr + S²wL	Todos los factores y variables que contribuyen a la variación en la cant. de EE en el periodo de diseño				0.20	0.0400	19.4		
Varianza Total So² = S²n + S²w	Todos los factores y variables que contribuyen a la variación en el diseño y comportamiento del pavimento			So =	0.45	0.2057	100.0	100.0	

ESTIMACIÓN DE S_o EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

Componentes de la Varianza del diseño- comportamiento	Variables que afectan el diseño y comportamiento de pavimentos flexibles					Estimadores de la variab. del comportamiento		Distribución de las Estimadas Varianzas	
	Variables	Subvariables	Factores Específicos de Diseño			Desviación Estándar	Varianza	% del Total	% del Total
			Nombre	Símbolo	Unidades	S	S ²		
S²nrf	Factores de diseño del pavimento que aparecen en la ecuación de diseño	Nivel de habilidad de servicio de pavimento	Indice de Serv. Inicial	P1		0.02	0.0003	0.3	0.6
			Indice de Serv. Final	Pt					
		Estructura de Pavimento sobre la subrasante	Espesor de la losa	D	in	0.10	0.0101	8.1	19.6
			Resistencia a la Flexotracción	Sc		0.13	0.0177	14.2	34.3
			Coef. Transferencia de carga	J		0.07	0.0044		
			Factor de Drenaje	Cd		0.13	0.0177	14.2	34.3
			Módulo Elástico	psi		0.01	0.0001	0.1	0.2
		Subrasante	Módulo Reacción Subrasante	K	pci	0.04	0.0013	1.0	2.5
						0.23	0.0515	41.4	100.0
S²nru	Todas las variables no identificadas que contribuyen al cambio en el comportamiento				0.10	0.0105	8.4		
S²nr = S²nrf+S²nru	Todos los factores y variables que contribuyen en el comportamiento de secciones con el mismo diseño y tránsito				0.25	0.0620	49.8		
S²WLd	Componentes que incluyen formas matemáticas, derivación de ctes. de ecuaciones, etc.								
S²WL = SUM (S²WLd)	Todos los factores que contribuyen a desviaciones entre el tránsito predic y el comportamiento medio				0.17	0.0282	22.7		
S²n = S²nr + S²WL	Todos los factores y variables que contribuyen a la variación en el comportamiento del pavimento por efecto de la predicción del tránsito				0.30	0.0902	72.4		
S²w = S²wr + S²wL	Todos los factores y variables que contribuyen a la variación en la cant. de EE en el periodo de diseño				0.19	0.0343	27.6		
Varianza Total So² = S²n + S²w	Todos los factores y variables que contribuyen a la variación en el diseño y comportamiento del pavimen			So =	0.35	0.1246	100.0	100.0	