

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

**VICEMINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS**

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO VIAL**

**ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL  
PARAMETRO CONFIABILIDAD (R)  
UTILIZADO EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS  
SEGUN AASHTO 1993**

**Elaborado por:** Marlex Lisandro Méndez\*, Ing. Civil.  
Depto. Investigación y Desarrollo.

Edwin Ricardo Alvarenga, Ing. Civil.  
Gerente, Depto. Investigación y Desarrollo.

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

**REPUBLICA DE EL SALVADOR, MARZO DE 2006.**

\* Laboró en la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial hasta el mes de Julio de 2007.

## **OBSERVACION**

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

# INDICE

	Página
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	2
3. Marco Teórico.....	2
4. La Confiabilidad en el Diseño de Pavimentos según AASHTO 1993.....	5
5. Incidencia de la Confiabilidad en la Determinación de Espesores de Estructuras de Pavimento.....	12
6. Conclusiones.....	17
7. Referencias.....	18

## La Confiabilidad (R) en el Diseño de Pavimentos

### **Resumen**

*En este documento se presenta información relacionada con el parámetro confiabilidad utilizado en el diseño de pavimentos, de acuerdo a las recomendaciones de la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993. Se presenta algunos conceptos estadísticos, la definición del concepto de confiabilidad y cómo interviene este parámetro en el diseño a través del factor de seguridad. Finalmente se presenta un análisis de la incidencia de dicho parámetro en la determinación de espesores de capa de rodadura de estructuras de pavimento rígido y flexible.*

### **1. Introducción.**

El buen desempeño de una estructura de pavimento a lo largo de su vida útil, está relacionado con la calidad de los materiales utilizados en su construcción, los procesos constructivos implementados y, sobre todo, que la estructura del pavimento sea la más adecuada para soportar las distintas sollicitaciones a las cuales estará sujeta. Este último aspecto se logra a partir de una buena estimación de los parámetros de diseño utilizados, de tal manera que éstos sean lo más representativo de las condiciones reales a la que estará expuesta la estructura de pavimento.

Sin embargo, en las estructuras de pavimentos así como en otro tipo de estructuras, no siempre es posible predecir con certeza las sollicitaciones a las que estará expuesta y por consiguiente el desempeño a lo largo de su periodo de diseño. La variabilidad en el comportamiento de un pavimento está influenciada por una serie de factores, algunos de los cuales, no pueden ser previstos con exactitud en la etapa de diseño, tal es el caso de las cargas de tráfico, las condiciones climáticas, entre otros.

La estimación de las cargas de tráfico tiene un alto grado de incertidumbre debido a muchos factores entre los que se puede mencionar el cambio en la distribución de ejes, la sobrecarga en los vehículos, el incremento o decremento del tráfico debido a un mayor o menor desarrollo económico. Así mismo, existe incertidumbre al momento de predecir las condiciones climatológicas a las que estará expuesta la estructura del pavimento o cambios en las condiciones del sistema de drenaje de la misma.

A lo anterior se suma que en la construcción de los pavimentos la calidad no es exactamente la misma, aún cuando se busca que los niveles de calidad se mantengan dentro de un rango establecido en las especificaciones o requerimientos técnicos de un proyecto. Por lo anterior, es de esperar que dos estructuras de pavimentos idénticos y construidos en el mismo sitio, muy probablemente tendrán comportamientos distintos a lo largo del periodo para el cual fueron diseñadas.

Los métodos de diseño han incorporado variables con las que intentan considerar la incertidumbre que existe en el diseño y en el comportamiento de un pavimento. En la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento AASHTO 1993, se ha adoptado el concepto de

confiabilidad con el objeto de evaluar en términos probabilísticos la variabilidad asociada con la estimación de las cargas de tráfico, así como la variabilidad asociada al desempeño de la estructura de pavimento.

En los siguientes capítulos se presenta información general de algunos conceptos estadísticos y conceptos relacionados con el diseño de pavimentos según la Guía de Diseño AASHTO 1993. Se presenta además información sobre el parámetro de confiabilidad, el factor de seguridad introducido al diseño con base en el nivel de confiabilidad asumido, su aplicación en el diseño y un análisis de la incidencia en la determinación de espesores.

## **2. Antecedentes**

El concepto de confiabilidad fue utilizado por primera vez en el diseño de pavimentos flexibles en 1973, en Texas (Texas Highway Department), Estados Unidos. Los conceptos fueron desarrollados e incorporados en los procedimientos de diseño de la AASHO (American Association of State Highway Officials) en 1973, y finalmente fueron adoptados en la Guía de Diseño AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) de 1986<sup>1</sup>.

Actualmente, en la Guía de Diseño AASHTO 93 (método de diseño empírico) se emplea el concepto de Confiabilidad para el diseño de pavimentos rígidos y flexibles, para considerar la variabilidad asociada con la estimación de las cargas de tráfico, así como la variabilidad asociada al desempeño de la estructura de pavimento. En la Guía de Diseño 2002 (método de diseño mecanístico-empírico), la incertidumbre y variabilidad en el diseño, es evaluada mediante modelos asociados al deterioro en los pavimentos y características de confort de la vía.

## **3. Marco Teórico.**

La variabilidad en el comportamiento de una estructura de pavimento no solo está asociada al diseño sino también al proceso constructivo y a la variación en las propiedades de los materiales que la constituyen. En la fase de construcción es conocido que los espesores de pavimento presentan en general pequeñas variaciones respecto a los establecidos en el diseño; similar situación se da cuando se trata de la ubicación de las dovelas o el módulo de rotura en los pavimentos de concreto hidráulico, valores de estabilidad en las mezclas asfálticas, entre otros. De aquí que los controles de calidad de los procesos constructivos y de los materiales, intentan mantener dentro de lo razonable dicha variabilidad; por lo que es necesario conocer algunos conceptos estadísticos, algunos de los cuales se presentan a continuación.

### **3.1. Conceptos Estadísticos.**

Las herramientas estadísticas son importantes para representar, interpretar y analizar información que nos permite tomar decisiones importantes y oportunas. Los conceptos que se presentan a

---

<sup>1</sup> Instituto Boliviano del Cemento y el Concreto

continuación están relacionados con la variabilidad que existe en el diseño, construcción y comportamiento de un pavimento.

**La media Aritmética.** Es el promedio aritmético de todas las observaciones medidas.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \tag{Ec. 1}$$

**Desviación Estándar.** Es una medida de la desviación de los datos con respecto a la media aritmética.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \tag{Ec. 2}$$

Una de las utilidades que se puede obtener de la desviación estándar, es cuando se considera esta como una unidad estándar de medida, midiendo la desviación de un valor determinado de X (variable en estudio) con relación a la media aritmética. La conversión de un valor bruto de X, en unidades estándar, se establece con la siguiente relación:

$$z = \frac{X - \bar{X}}{S} \tag{Ec. 3}$$

**Curva de Distribución Normal.** La curva de distribución normal es una distribución de datos que puede ser empleada para describir muchos tipos de medidas ingenieriles. La distribución de datos también puede ser presentada mediante histogramas, los cuales tienden a definir mejor la forma de la curva de distribución normal cuanto más grande es el número de medidas (ver figura 1).

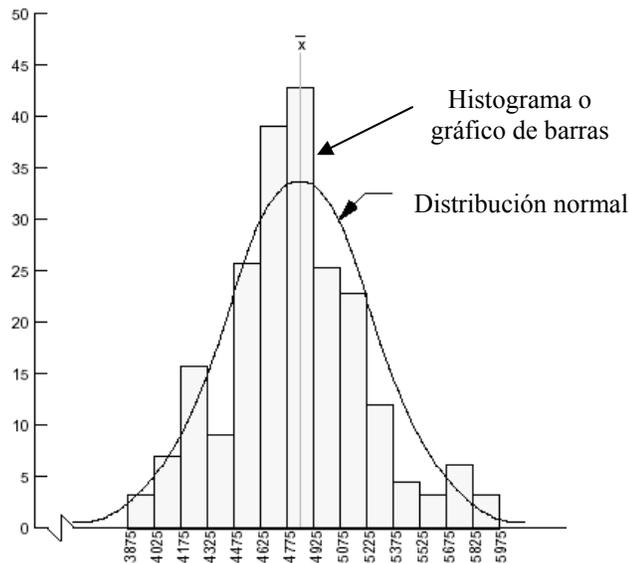


Figura 1. Histograma y curva de distribución normal.  
Fuente: Adaptado de Washington Department of Transport

Existen diferentes tipos de distribución tales como la distribución normal, log normal, gamma, beta, otros; muchas variables tienen un comportamiento de distribución normal, tal es el caso de

variables económicas, sociales, físicas, entre otras. Ejemplo de algunas variables que tienen un comportamiento de distribución normal son el peso de objetos o personas, la estatura, la vida útil de productos eléctricos, el tiempo que una persona tarda en trasladarse de un lugar a otro, el tránsito que puede soportar una estructura de pavimento a lo largo del periodo de diseño, entre otros.

La curva de distribución normal tiene forma de campana, y esta forma depende del grado de dispersión de las medidas. Cuanto mayor es la desviación estándar más aplanada será la curva (ver figura 2).

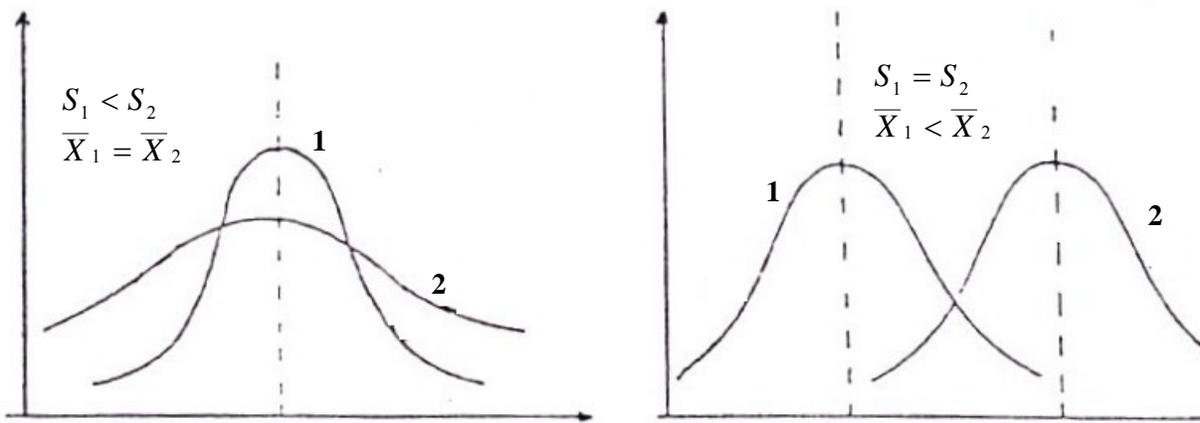


Figura 2. Diferentes casos de curvas de distribución normal.  
Fuente: Adaptado de Instituto Boliviano del Cemento y el Concreto

La desviación estándar guarda una relación con las distribuciones que tienden a la simetría o perfectamente normales. Asimismo, una distribución normal se define por su media aritmética y por su desviación estándar.

Las curvas de distribución normal pueden ser estandarizadas y empleadas para determinar la probabilidad de que una variable sea mayor o menor que un valor determinado. En la tabla 1 se muestran valores de área bajo la curva de distribución normal para el caso cuando se desea conocer la probabilidad de que un valor será excedido. En una curva estandarizada el valor medio es igual a 0 y la desviación estándar es igual a 1; asimismo, el área bajo la curva es igual a 1 o su equivalente: 100%.

Normal Deviate z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
-4.0	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-3.9	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-3.8	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-3.7	.0001	.0001	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-3.6	.0002	.0002	.0001	.0001	.0001	.0001	.0001	.0001	.0001	.0001
-3.5	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002
-3.4	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0002
-3.3	.0005	.0005	.0005	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0003
-3.2	.0007	.0007	.0006	.0006	.0006	.0006	.0006	.0005	.0005	.0005
-3.1	.0010	.0009	.0009	.0009	.0008	.0008	.0008	.0008	.0007	.0007
-3.0	.0013	.0013	.0013	.0012	.0012	.0011	.0011	.0011	.0010	.0010
-2.9	.0019	.0018	.0018	.0017	.0016	.0016	.0015	.0015	.0014	.0014
-2.8	.0026	.0025	.0024	.0023	.0023	.0022	.0021	.0021	.0020	.0019
-2.7	.0035	.0034	.0033	.0032	.0031	.0030	.0029	.0028	.0027	.0026
-2.6	.0047	.0045	.0044	.0043	.0041	.0040	.0039	.0038	.0037	.0036
-2.5	.0062	.0060	.0059	.0057	.0055	.0054	.0052	.0051	.0049	.0048
-2.4	.0082	.0080	.0078	.0075	.0073	.0071	.0069	.0068	.0066	.0064
-2.3	.0107	.0104	.0102	.0099	.0096	.0094	.0091	.0089	.0087	.0084
-2.2	.0139	.0136	.0132	.0129	.0125	.0122	.0119	.0116	.0113	.0110
-2.1	.0179	.0174	.0170	.0166	.0162	.0158	.0154	.0150	.0146	.0143
-2.0	.0228	.0222	.0217	.0212	.0207	.0202	.0197	.0192	.0188	.0183
-1.9	.0287	.0281	.0274	.0268	.0262	.0256	.0250	.0244	.0239	.0233
-1.8	.0359	.0351	.0344	.0336	.0329	.0322	.0314	.0307	.0301	.0294
-1.7	.0446	.0436	.0427	.0418	.0409	.0401	.0392	.0384	.0375	.0367
-1.6	.0548	.0537	.0526	.0516	.0505	.0495	.0485	.0475	.0465	.0455
-1.5	.0668	.0655	.0643	.0630	.0618	.0606	.0594	.0582	.0571	.0559
-1.4	.0808	.0793	.0778	.0764	.0749	.0735	.0721	.0708	.0694	.0681
-1.3	.0968	.0951	.0934	.0918	.0901	.0885	.0869	.0853	.0838	.0823
-1.2	.1151	.1131	.1112	.1093	.1075	.1056	.1038	.1020	.1003	.0985
-1.1	.1357	.1335	.1314	.1292	.1271	.1251	.1230	.1210	.1190	.1170
-1.0	.1587	.1562	.1539	.1515	.1492	.1469	.1446	.1423	.1401	.1379
-0.9	.1841	.1814	.1788	.1762	.1736	.1711	.1685	.1660	.1635	.1611
-0.8	.2119	.2090	.2061	.2033	.2005	.1977	.1949	.1922	.1894	.1867
-0.7	.2420	.2389	.2358	.2327	.2296	.2266	.2236	.2206	.2177	.2148
-0.6	.2743	.2709	.2676	.2643	.2611	.2578	.2546	.2514	.2483	.2451
-0.5	.3085	.3050	.3015	.2981	.2946	.2912	.2877	.2843	.2810	.2776
-0.4	.3446	.3409	.3372	.3336	.3300	.3264	.3228	.3192	.3156	.3121
-0.3	.3821	.3783	.3745	.3707	.3669	.3632	.3594	.3557	.3520	.3483
-0.2	.4207	.4168	.4129	.4090	.4052	.4013	.3974	.3936	.3897	.3859
-0.1	.4602	.4562	.4522	.4483	.4443	.4404	.4364	.4325	.4286	.4247
-0.0	.5000	.4960	.4920	.4880	.4840	.4801	.4761	.4721	.4681	.4641

Tabla 1. Área bajo la curva de distribución estándar.

Fuente: Adaptado de Washington Department of Transport

#### 4. La Confiabilidad en el Diseño de Pavimentos Según AASHTO 1993

La confiabilidad (R) es la variable por medio de la cual se incorpora cierto grado de certidumbre en el proceso de diseño, introduciendo un nivel predeterminado de seguridad a través del cual el pavimento será capaz de resistir las cargas de tráfico para el periodo que fue diseñado. Esta es una variable de entrada por medio de la cual se introduce un factor de seguridad al diseño del pavimento, cuyo valor depende del nivel de confiabilidad elegido y del error estándar combinado que se espera de todos los factores que influyen en el comportamiento de una estructura de pavimento.

## 4.1. Concepto de Confiabilidad

Por medio de esta variable se considera la variación en la predicción del tráfico ( $w_T$ ) y la variación en la predicción del desempeño ( $W_t$ ) del pavimento en términos de aplicaciones de carga. La Guía de Diseño AASHTO 93 define la Confiabilidad de la siguiente manera: “La confiabilidad del diseño de un pavimento, es la probabilidad que la estructura de pavimento diseñada, se desempeñará satisfactoriamente para las cargas de tráfico y condiciones ambientales para el periodo que fue diseñada”.

## 4.2. Definición de Confiabilidad

Por definición, el diseño de un pavimento es satisfactorio siempre y cuando el pavimento no alcance el nivel mínimo de serviciabilidad (serviciabilidad final) antes de que las **cargas de tráfico** (ESALs) previstas para el periodo de diseño, hallan sido aplicadas. Así, el éxito del diseño es representado por las siguientes expresiones:

$$\log N_t \geq \log n_T \quad \text{ó} \quad \text{Ec. 4}$$

$$(\log N_t - \log n_T) \geq 0 \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$\log N_t$  = Número de ejes equivalentes que soporta la estructura del pavimento antes de alcanzar el mínimo de serviciabilidad.

$\log n_t$  = Número de ejes equivalentes previstos que actuarán sobre el pavimento en su periodo de diseño.

Asimismo  $\log N_t - \log n_T$  es la desviación del error combinado ( $\delta_{nN}$ ), y por lo tanto:

$$\delta_{nN} \geq 0 \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$\delta_{nN} = \delta_{nw} + \delta_{wN} + \text{Log } F_R$

$\delta_{nw}$  = Error asociado a la predicción del tráfico

$\delta_{wN}$  = Error asociado a la predicción en el desempeño del pavimento

$\log F_R$  = Factor de confiabilidad del diseño

Además, la media de la distribución de  $\delta_{nN}$  es:

$$\overline{\delta_{nN}} = \overline{\delta_{nw}} + \log F_R + \overline{\delta_{wN}} = 0 + \text{Log } F_R + 0 = \text{Log } F_R \quad \text{Ec. 7}$$

La confiabilidad del diseño de un pavimento es la probabilidad de que el pavimento se **desempeñará adecuadamente** ante las aplicaciones de cargas previstas, y que la capacidad estructural estará por encima de las cargas aplicadas, para su periodo de diseño. Lo anterior puede ser representado de la siguiente manera:

$$R = \text{Pr ob}(\log N_t - \log n_T) > 0 \quad , \text{ o} \quad \text{Ec. 8}$$

$$R = \text{Pr ob}(\delta_{nN}) \geq 0 \quad \text{Ec. 9}$$

La expresión anterior también puede ser representada por medio del siguiente gráfico:

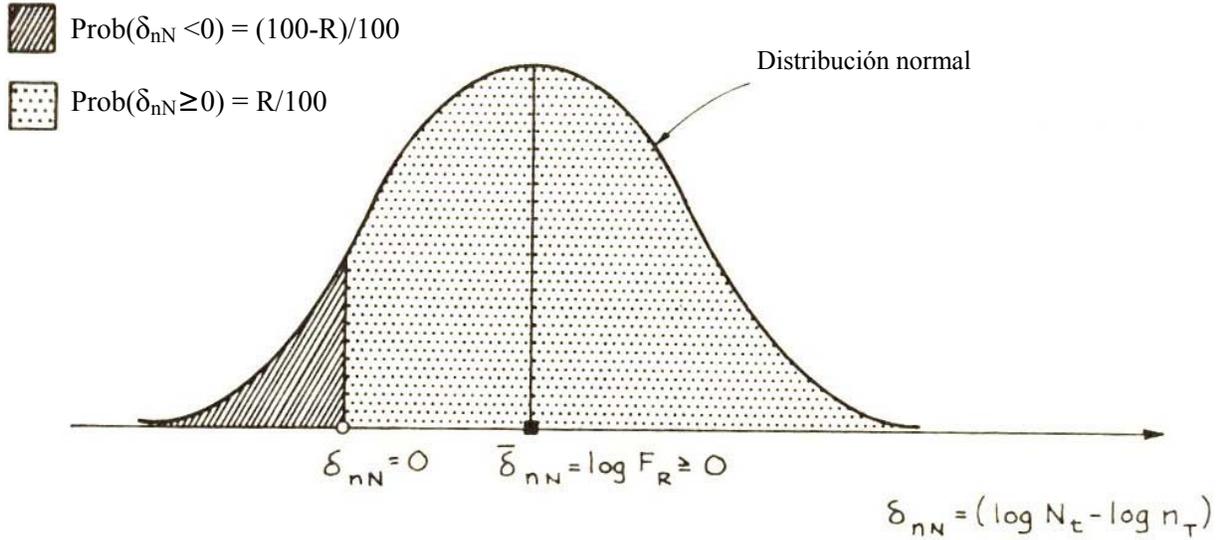


Figura 2. Definición gráfica de la confiabilidad (R) y factor de confiabilidad de diseño.  
Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993

La evaluación de la confiabilidad R o 100-R, comienza con la transformación de  $\delta_{nN}$  en z.

$$z = \frac{(\delta_{nN} - \overline{\delta_{nN}})}{S_{nN}} \quad \text{Ec. 10}$$

De la figura 2, se obtiene que  $\overline{\delta_{nN}} = \text{Log}F_R$  y  $S_{nN} = S_o$ , y la expresión queda de la siguiente manera:

$$z = \frac{(\delta_{nN} - \text{Log}F_R)}{S_o} \quad \text{Ec. 11}$$

El punto donde  $\delta_{nN} = 0$ , el valor de z es  $Z_R$ :

$$Z_R = \frac{-\text{Log}F_R}{S_o} \quad \text{Ec. 12}$$

Manipulando la expresión anterior se obtiene que el factor de seguridad puede definirse a través de la siguiente expresión:

$$F_R = 10^{-Z_R S_o} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

- $F_R$  = Factor de seguridad en el diseño
- $Z_R$  = Factor estadístico de confiabilidad
- $S_o$  = Error estándar combinado

Para un determinado nivel de confiabilidad (R), el valor de  $Z_R$  es determinado de la tabla 1, entrando con el resultado obtenido de (100-R)/100.

### 4.3. Selección del Nivel de Confiabilidad y Factor de Seguridad

La Guía AASHTO 1993 recomienda diferentes niveles de confiabilidad de acuerdo a una clasificación funcional. En la tabla 2 se presentan los rangos de confiabilidad según el tipo de vía:

Clasificación Funcional	Nivel de Confiabilidad Recomendado	
	Urbana	Rural
Autopistas y Carreteras Interestatales	85-99.9	80-99.9
Arterías principales	80-99	75-95
Colectoras	80-95	75-95
Calles locales	50-80	50-80

Tabla 2. Niveles de confiabilidad sugeridos con base en una clasificación funcional.  
Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993

El concepto de confiabilidad interviene en el diseño a través de un factor de seguridad el cual es definido por dos variables: el factor estadístico de confiabilidad ( $Z_R$ ), el cual es referido en la Guía de Diseño como desviación estándar, y el error estándar combinado ( $S_o$ ). El valor de  $Z_R$  depende del nivel de confiabilidad seleccionado y puede ser determinado a través de la Tabla 1. Por ejemplo, para un nivel de confiabilidad del 90%, se busca el valor de  $Z_R$  correspondiente entrando a la tabla con el resultado de  $(100-R)/100 = 0.10$ ; sin embargo los valores más próximos encontrados son 0.1003 ( $Z_R = -1.28$ ) y 0.0985 ( $Z_R = -1.29$ ), por lo que se realiza una interpolación entre dichos valores obteniéndose para 0.10 un  $Z_R = -1.282$ . Para obtener el factor de seguridad en el diseño, el valor de  $Z_R$  es introducido en la ecuación 13. Es de notar que cuando se emplea un nivel de confiabilidad de diseño del 50%, el valor de  $Z_R$  correspondiente es igual a cero y por lo tanto el factor de seguridad es igual a 1.0.

Una vez seleccionado el nivel de confiabilidad se debe considerar el valor del error estándar combinado ( $S_o$ ), representativo de las condiciones locales. Esta variable considera la variabilidad asociada a cada uno de los parámetros involucrados en el diseño. La Guía AASHTO 1993 recomienda adoptar valores de  $S_o$  comprendidos dentro de los siguientes intervalos:

- Pavimentos rígidos: 0.30 – 0.40
  - 0.35 para construcción nueva
  - 0.39 para sobrecapas
- Pavimentos flexibles: 0.40 – 0.50
  - 0.45 para construcción nueva
  - 0.49 para sobrecapas

El error estándar combinado está compuesto por el error asociado a la predicción del tráfico y el error asociado a la predicción en el desempeño del pavimento.

$$S_o^2 = S_{mv}^2 + S_{WN}^2 \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:  $S_o$  = Error estándar combinado  
 $S_{nw}$  = Error asociado a la predicción del tráfico  
 $S_{WN}$  = Error asociado a la predicción en el desempeño del pavimento

Algunos valores recomendados de  $S_o$ , con base en el número de ejes equivalentes esperados se presentan en la Tabla 3.

Número De Ejes Equivalentes (Millones de Ejes)	Valores de $S_o$	
	Pavimento Flexible	Pavimento Rígido
<40	0.45	0.35
50	0.43	0.33
60	0.42	0.32
70	0.41	0.31
$\geq 80$	0.40	0.30

Tabla 3. Valores de desviación estándar para diferentes niveles de número de ejes acumulados.  
Fuente: Recomendaciones Para el Diseño de Pavimentos en Chile Según AASHTO

En la tabla 4 se presentan factores de seguridad obtenidos mediante la utilización de la ecuación 13 (Ec. 13), los cuales corresponden a pavimentos flexibles y rígidos para diversos niveles de confiabilidad.

Nivel de Confiabilidad	Factor estadístico de confiabilidad ( $Z_R$ )	Factor de seguridad, $F_R$	
		Flexible ( $S_o=0.45$ )	Rígido ( $S_o=0.35$ )
50	0.000	1.00	1.00
55	-0.120	1.13	1.10
60	-0.253	1.30	1.23
65	-0.380	1.48	1.36
70	-0.524	1.74	1.53
75	-0.674	2.00	1.72
80	-0.841	2.39	1.97
85	-1.037	2.94	2.31
90	-1.282	3.77	2.81
95	-1.645	5.53	3.76
99	-2.327	11.15	6.52
99.9	-3.090	24.58	12.06

Tabla 4. Niveles de confiabilidad y factores de seguridad para pavimentos flexibles y rígidos.

#### 4.4. La Confiabilidad y Fases de Construcción

Para el caso en que en el diseño se consideran fases de construcción o de rehabilitación de la vía (periodo de diseño inferior al periodo de análisis), la confiabilidad debe ser extendida para incluir la incertidumbre en cada una de dichas fases. Por lo anterior, la confiabilidad de cada una de las fases estará definida por la siguiente expresión:

$$R_{fase} = R_{total}^{1/n} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

$R_{fase}$  = Confiabilidad para cada una de las fases  
 $R_{total}$  = Confiabilidad para el periodo de análisis  
 n = número de fases de rehabilitación

#### 4.5. Aplicación de la Confiabilidad en el Diseño de Pavimentos según AASHTO 1993

La Guía de Diseño AASHTO 1993 propone algunas expresiones empíricas para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos, las cuales están basadas en la suposición de que el diseño de una estructura de pavimento está en función del daño que produce el paso de un eje estándar de 18,000 libras.

##### Diseño de Pavimentos Flexibles

El diseño de pavimentos flexibles puede realizarse mediante el uso de nomogramas o por medio del empleo de la expresión indicada en la Ecuación 16. El resultado obtenido por cualquiera de los métodos que se emplee es el número estructural (SN), el cual es un valor abstracto que representa la capacidad de una estructura de pavimento (capa de mezcla asfáltica, base y subbase) para soportar la aplicación de ejes equivalentes de 18,000 libras.

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left[ \frac{\Delta PSI}{4.20 - 150} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07 \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

$W_{18}$  = Número de ejes equivalentes de diseño (equivalentes a 18,000 libras)  
 $Z_R$  = Factor estadístico de confiabilidad  
 $S_o$  = Error estándar combinado  
 $M_R$  = Módulo de Resiliencia  
 $\Delta PSI$  = Diferencia entre los índices de serviciabilidad inicial (Pi) y final (Pt)  
**SN** = **Número estructural**

A partir del número estructural (SN), se determinan los espesores de las distintas capas del pavimento flexible, evaluando el aporte estructural que cada una de éstas tiene en la estructura del pavimento, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

$a_1, a_2, a_3$  = coeficientes de capa de la capa de rodadura, base y subbase de la estructura del pavimento, respectivamente.

$D_1, D_2, D_3$  = espesores de superficie, base y subbase de la estructura del pavimento, respectivamente (en pulgadas).

$m_2, m_3$  = coeficientes de drenaje para capas base y subbase, respectivamente.

## Diseño de Pavimentos Rígidos

El diseño de pavimentos rígidos puede realizarse mediante el uso de nomogramas o por medio del empleo de la siguiente expresión (Ec. 18).

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 7.35 \log(D+1) - 0.06 + \frac{\text{LOG}\left(\frac{\Delta \text{PSI}}{4.5 - 1.50}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32Pt) \log \left[ \frac{S'c \times Cd [D^{0.75} - 1.132]}{215.63 \times J \left[ D^{0.75} - \frac{18.42}{(Ec/k)^{0.25}} \right]} \right] \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

- $W_{18}$  = Número de ejes equivalentes de diseño (equivalentes a 18,000 libras)
- $Z_R$  = Factor estadístico de confiabilidad
- $S_o$  = Error estándar combinado
- $D$  = Espesor del pavimento (pulg.)
- $\Delta \text{PSI}$  = Diferencia entre los índices de serviciabilidad inicial (Pi) y final (Pt)
- $Pt$  = Índice de serviciabilidad final
- $S'c$  = Módulo de rotura del concreto (psi)
- $J$  = Coeficiente de transferencia de carga
- $Cd$  = Coeficiente de drenaje
- $Ec$  = Módulo de elasticidad del concreto (psi)
- $K$  = Módulo de reacción de la subrasante (pci)

En general, las expresiones para el diseño de espesores de pavimentos rígidos y flexibles propuestas por la AASHTO 1993, presentan la estructura siguiente:

$$\text{Log}(ESALs_{\text{DISEÑO}}) = Z_R S_o + \text{Log}(ESAL_{\text{PREVISTO}}) \quad \text{Ec. 19}$$

Como se indicó anteriormente, la confiabilidad es aplicada en el diseño mediante el uso de un factor de seguridad ( $F_R$ ) que multiplica el ESAL's previsto para el periodo de diseño ( $w_T$ ) para obtener una estructura que pueda soportar un número de ESAL's ( $W_i$ ) antes que alcance un

determinado nivel de serviciabilidad (Pt). Lo anterior puede ser representado por medio de la siguiente expresión:

$$W_i = F_R \times w_T \quad \text{Ec. 20}$$

## 5. Incidencia de la Confiabilidad en los Espesores de Estructuras de Pavimento

Con el objeto de ilustrar la incidencia de la Confiabilidad en los espesores de estructuras de pavimentos, se presentan los ejemplos para un pavimento flexible y un pavimento rígido, los cuales son evaluados para diferentes de niveles de confiabilidad. La incidencia en los espesores es evaluada únicamente en el espesor de la capa de rodadura (espesor de carpeta asfáltica y espesor de losa de concreto hidráulico) para cada tipo de pavimento.

### 5.1. Incidencia en Pavimentos Flexibles

Los parámetros de diseño empleados para evaluar la incidencia de la confiabilidad, en la determinación de espesores de capa de rodadura, son los que se muestran a continuación:

ESAL's previsto ( $w_T$ ) = 20,000,000

Periodo de diseño = 20 años

Error estándar combinado ( $S_o$ ) = 0.45 (AASHTO recomienda valores entre 0.40 a 0.50)

Confiabilidad ( $R$ ) = 85%

Módulo de resiliencia ( $M_R$ ) = 5,000 psi

Índice de serviciabilidad inicial ( $p_i$ ) = 4.20

Índice de serviciabilidad final ( $p_t$ ) = 2.25

A partir de lo anterior se ha determinado que se requiere una estructura de pavimento con un número estructural (SN) de 5.76, a partir de lo cual se propone una estructura con los espesores de capas indicados en la tabla 5.

Capa	Coefficiente de Capa	Coefficiente de Drenaje	Espesor de Capa Requerido (Pulgadas)	SN
Mezcla asfáltica	0.42	---	5.75	2.42
Base suelo-cemento	0.16	1.10	10.00	1.76
Subbase	0.12	1.10	12.00	1.58
Total SN				<b>5.76</b>

Tabla 5. Detalle de espesores de diseño para pavimento asfáltico.

Considerando la estructura de pavimento indicada en la tabla 5, se ha realizado una variación del parámetro de confiabilidad; en la tabla 6 se muestran la variación del valor de SN, dependiendo del nivel de confiabilidad adoptado, así como el cambio en el espesor de mezcla asfáltica.

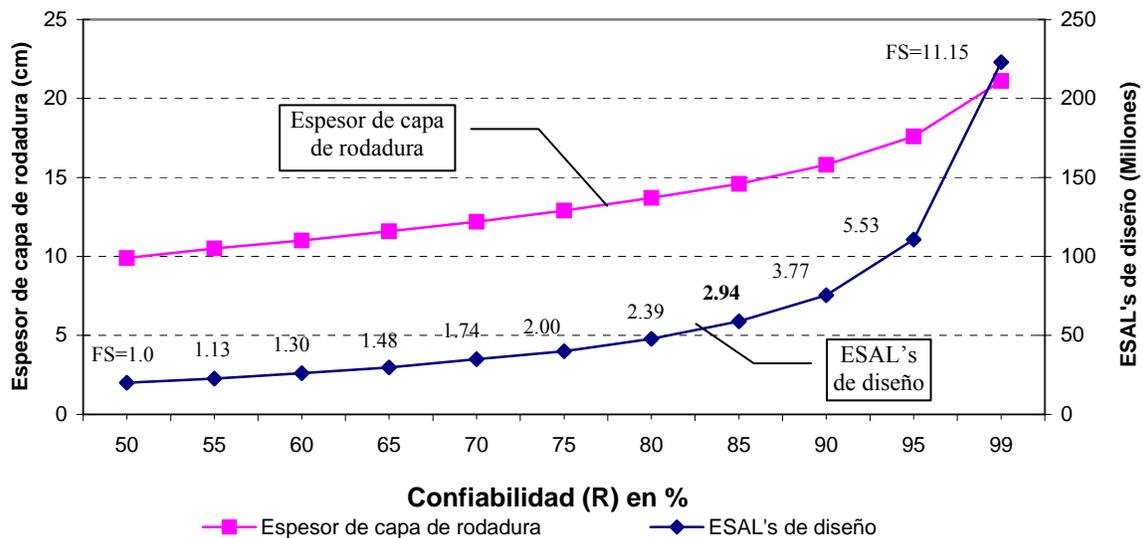
Además, en la columna del extremo derecho se presenta la variación de la capacidad de la estructura de pavimento en términos de repeticiones de carga (ESAL's de diseño).

Nivel de Confiabilidad (R)	Factor de Seguridad, $F_R$	SN necesario	Espesor de capa de rodadura requerido, Pulgadas (cm)	Variación en el espesor, pulg. (cm)	Variación en el espesor (%)	ESAL's de diseño, $W_i = F_R \times w_T^*$
50	1.00	4.98	3.90 (9.9)	-1.85 (-4.7)	-32.2	20,000,000
55	1.13	5.07	4.12 (10.5)	-1.63 (-4.1)	-28.3	22,600,000
60	1.30	5.16	4.33 (11.0)	-1.42 (-3.6)	-24.7	26,000,000
65	1.48	5.26	4.57 (11.6)	-1.18 (-3.0)	-20.5	29,600,000
70	1.74	5.36	4.81 (12.2)	-0.94 (-2.4)	-16.3	34,800,000
75	2.00	5.48	5.08 (12.9)	-0.67 (-1.7)	-11.7	40,000,000
80	2.39	5.61	5.38 (13.7)	-0.37 (-0.9)	-6.4	47,800,000
<b>85</b>	<b>2.94</b>	<b>5.76</b>	<b>5.75 (14.6)</b>	<b>0.00 (0.0)</b>	<b>0.0</b>	<b>58,800,000</b>
90	3.77	5.95	6.21 (15.8)	0.46 (1.2)	8.0	75,400,000
95	5.53	6.25	6.92 (17.6)	1.17 (3.0)	20.3	110,600,000
99	11.15	6.84	8.32 (21.1)	2.57 (6.5)	44.7	223,000,000

\* $W_i$ =ESAL's de diseño;  $F_R$ =factor de seguridad;  $w_T$ =ESAL's previsto.

Tabla 6. Variación del espesor del pavimento y ESAL's de diseño, en relación con nivel de confiabilidad adoptado.

A partir de los resultados, se observa que si el diseño se hubiera realizado para un nivel de confiabilidad del 50%, el resultado sería una estructura de pavimento con un número estructural requerido de 4.98, con un factor de seguridad ( $F_R$ ) igual a 1.0 (ver tabla 6). Sin embargo, al utilizar un nivel de confiabilidad del 85%, se introduce al diseño un factor de seguridad de 2.94 con el cual se requiere un incremento en el número estructural de 0.78, que es el equivalente a obtener una estructura con una capacidad adicional de 38.8 millones de ejes equivalentes. Los resultados de variación de espesor de pavimento y el número de ejes equivalentes, respecto al nivel de confiabilidad seleccionado, se presentan gráficamente en la figura 3.

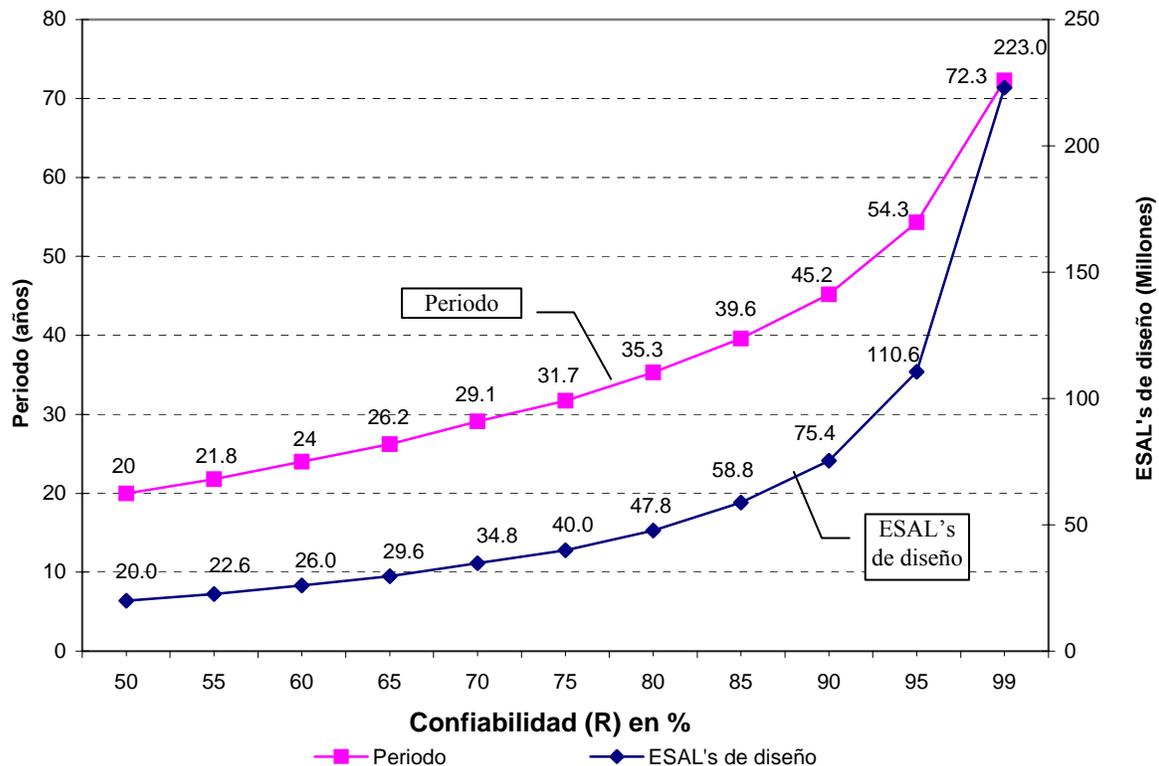


*Figura 3. Variación del espesor de capa de rodadura y ESAL's de diseño versus Confiabilidad.*  
 En la figura 3 se observa que para niveles de confiabilidad entre 50% y 80%, los factores de seguridad ( $F_R$ ) presentan una variación aproximadamente lineal (tasa de incremento de aproximadamente 3.8% por unidad de confiabilidad); dicha variación equivale a un incremento de espesor de mezcla asfáltica de aproximadamente 0.6 cm por cada 5 unidades de nivel de confiabilidad. Además, los factores de seguridad correspondientes a niveles de confiabilidad superiores al 80% varían exponencialmente. Dicha variación se puede representar de manera aproximada según la siguiente expresión:

Ec. 21

$$F_R = 0.0175e^{0.06 \times R}; \text{ para } : R \geq 80$$

En la figura 4 se presenta gráficamente la incidencia del nivel de confiabilidad en la capacidad de la estructura de pavimento en términos de ejes equivalentes (ESAL's) y el periodo estimado para que dichas repeticiones de carga sean aplicadas. Como se mencionó anteriormente, con la capacidad excedente que se introduce por el factor de seguridad en el diseño, se pretende cubrir la incertidumbre en la predicción del tráfico y en el comportamiento del pavimento. El análisis ha sido elaborado considerando una tasa de crecimiento del tráfico de 3.5% y un periodo de diseño de 20 años.



*Figura 4. ESAL's de diseño versus Confiabilidad.*

## 5.2. Incidencia en Pavimentos Rígidos

Para ilustrar la incidencia de la confiabilidad en el espesor de pavimentos rígidos, a continuación se presenta un ejemplo, en el cual se han empleado los siguientes parámetros:

ESAL's previsto = 20,000,000

Periodo de diseño = 20 años

Error estándar combinado ( $S_o$ ) = 0.35 (AASHTO recomienda valores entre 0.30 a 0.40)

Confiabilidad (R) = 85%

Módulo de rotura ( $S^c$ ) = 650 psi

Módulo de Elasticidad = 4,387,500 psi

Factor de transferencia de carga (J) = 2.8

Módulo de reacción de la subrasante (k) = 600 pci

Coefficiente de drenaje (Cd) = 1.1

Índice de serviciabilidad inicial ( $p_i$ ) = 4.50

Índice de serviciabilidad final ( $p_f$ ) = 2.50

A partir de lo anterior se ha determinado que se requiere una estructura de pavimento rígido con un espesor de capa de rodadura de concreto hidráulico de 8.77 pulgadas (22.3 cm). Con el objeto de determinar la incidencia del parámetro de confiabilidad, se ha realizado la determinación del espesor de losa de concreto para diferentes valores de dicho parámetro. En la tabla 7 se muestran los resultados de la variación del espesor de la capa de rodadura de concreto hidráulico respecto al nivel de confiabilidad seleccionado y en la columna del extremo derecho de la tabla, se presenta la variación de los ESAL's de diseño correspondientes.

Nivel de Confiabilidad (R)	Factor de seguridad, $F_R$	Espesor de capa de rodadura de concreto hidráulico requerido, Pulg. (cm)	Variación en el espesor, pulg. (cm)	Variación en el espesor (%)	ESAL's de diseño, $W_i = F_R \times w_T^*$
50	1.00	7.46 (18.9)	-1.31 (3.3)	-15.9	20,000,000
55	1.10	7.62 (19.3)	-1.15 (2.9)	-13.1	22,000,000
60	1.23	7.78 (19.8)	-0.99 (2.5)	-11.3	24,600,000
65	1.36	7.95 (20.2)	-0.82 (2.1)	-9.3	27,200,000
70	1.53	8.12 (20.6)	-0.65 (1.6)	-7.4	30,600,000
75	1.72	8.30 (21.1)	-0.47 (1.2)	-5.4	34,400,000
80	1.97	8.51 (21.6)	-0.26 (0.7)	-3.0	39,400,000
<b>85</b>	<b>2.31</b>	<b>8.77 (22.3)</b>	<b>0.0 (0.0)</b>	<b>0.0</b>	<b>46,200,000</b>
90	2.81	9.08 (23.1)	0.31 (0.8)	3.5	56,200,000
95	3.76	9.56 (24.3)	0.79 (2.0)	9.0	75,200,000
99	6.52	10.50 (26.7)	1.73 (4.4)	19.7	130,400,000

\* $W_i$ =ESAL's de diseño;  $F_R$ =factor de seguridad;  $w_T$ =ESAL's previsto.

Tabla 7. Variación del espesor de la capa de rodadura de concreto hidráulico y del número de ESAL's de diseño, en relación con el nivel de confiabilidad adoptado.

Al utilizar un nivel de confiabilidad del 85%, se introduce al diseño un factor de seguridad ( $F_R$ ) de 2.31, lo que conlleva requerir una estructura con una capacidad para soportar 26.2 millones de ejes equivalentes adicionales y consecuentemente es necesario un incremento en el espesor del pavimento en 0.26 pulgadas (0.7 cm). Los valores de espesores de capa de rodadura y el número de ejes equivalentes capaz de soportar son presentados gráficamente en la figura 5.

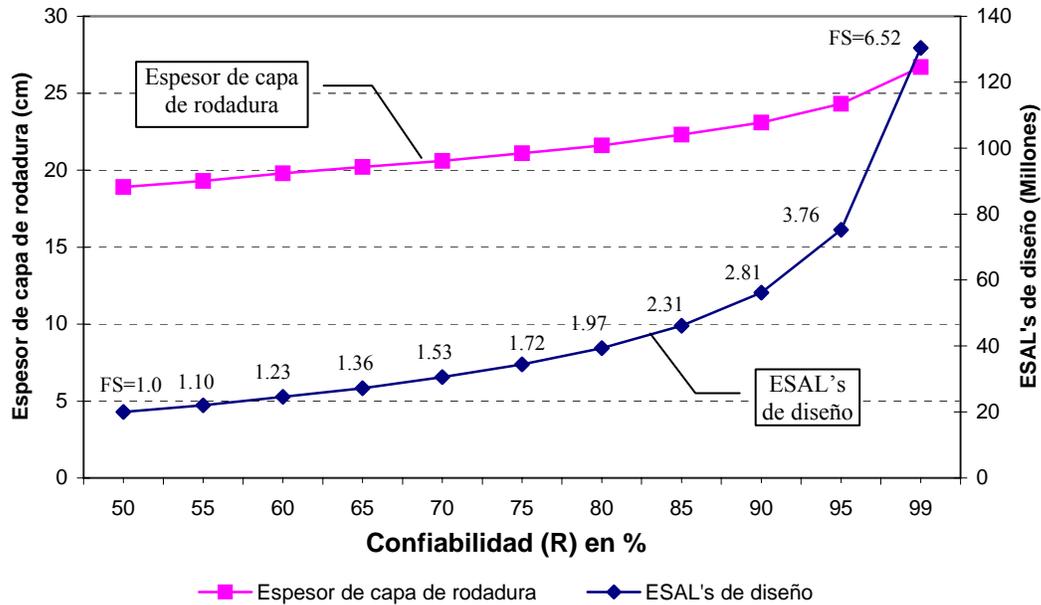


Figura 5. Variación del espesor de capa de rodadura de concreto hidráulico versus Confiabilidad.

En la figura 5 se observa que para niveles de confiabilidad entre el 50% y 80%, los factores de seguridad presentan aproximadamente una variación lineal (tasa de incremento de aproximadamente del 2.8% por unidad de confiabilidad). Lo anterior equivale aproximadamente a un incremento de 0.5 cm en el espesor de concreto hidráulico, por cada 5 unidades de nivel de confiabilidad. Sin embargo, los factores de seguridad ( $F_R$ ) correspondientes a niveles de confiabilidad superiores al 80% varían exponencialmente. Dicha variación se puede representar de manera aproximada según la siguiente expresión:

$$F_R = 0.047e^{0.046 \times R}; \text{ para } : R \geq 80 \quad \text{Ec. 22}$$

En la figura 6 se presenta gráficamente la incidencia del nivel de confiabilidad en la capacidad de la estructura de pavimento en términos de ejes equivalentes (ESAL's) y el periodo estimado para que dichas repeticiones de carga sean aplicadas. El análisis ha sido elaborado considerando una tasa de crecimiento del tráfico de 3.5% y un periodo de diseño de 20 años.

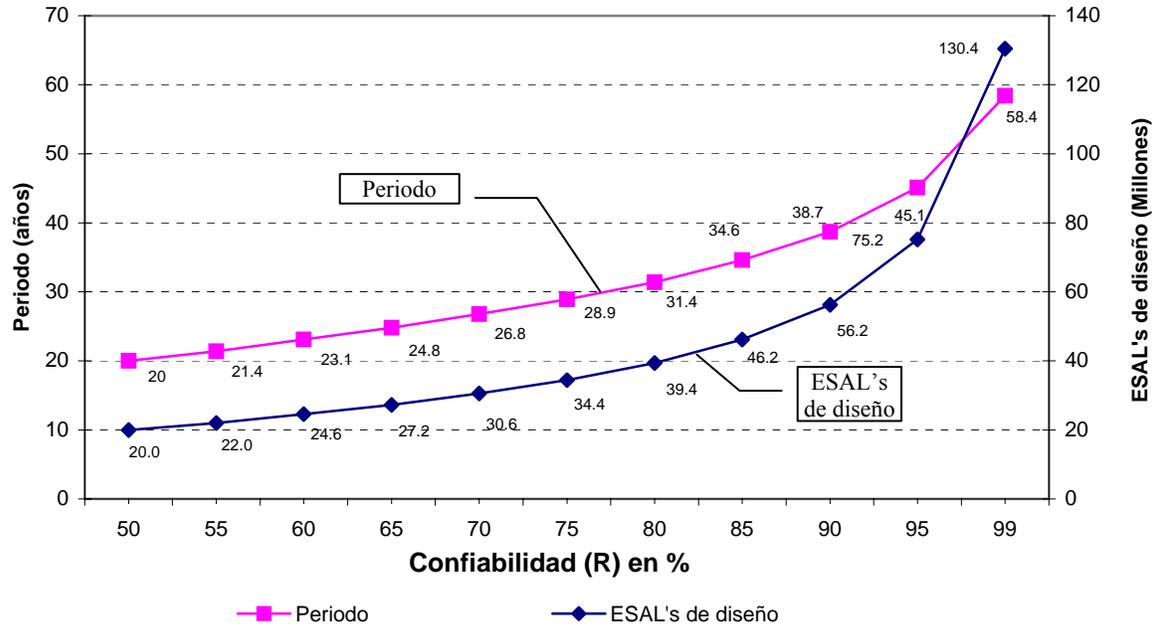


Figura 6. ESAL's de diseño versus Confiabilidad.

## 6. Conclusiones

- La selección del nivel de confiabilidad depende de una clasificación funcional (autopistas, arterias principales, colectoras, otras) así como de la ubicación del proyecto (zona rural o urbana) y no del tipo de pavimento a construir (flexible o rígido).
- La confiabilidad interviene en el diseño de espesores de pavimentos a través de la incorporación de un factor de seguridad, lo que resulta en un incremento en los espesores de la misma. Así, para mayores niveles de confiabilidad existe mayor probabilidad de que la estructura se comporte de acuerdo a lo previsto.
- Los factores de seguridad para pavimentos flexibles, correspondientes a niveles de confiabilidad entre el 50% e inferiores al 80% con un  $S_o=0.45$ , presentan aproximadamente una variación lineal (tasa de incremento de aproximadamente del 3.8%). Lo anterior equivale a un incremento de 0.6 cm aproximadamente en el espesor de mezcla asfáltica, por cada 5 unidades de nivel de confiabilidad. Asimismo, los factores de seguridad correspondientes a niveles de confiabilidad superiores al 80% presentan una variación exponencial aproximadamente.
- Los factores de seguridad para pavimentos rígidos, correspondientes a niveles de confiabilidad entre el 50% e inferiores al 80% con un  $S_o=0.35$ , presentan aproximadamente una variación lineal (tasa de incremento de aproximadamente del 2.8%). Lo anterior equivale

a un incremento de 0.5 cm aproximadamente en espesor de concreto hidráulico, por cada 5 unidades de nivel de confiabilidad. Asimismo, los factores de seguridad correspondientes a niveles de confiabilidad superiores al 80% presentan una variación exponencial aproximadamente.

## 7. Referencias

- “*Design of Pavement Structures*” Volume 1. American Association of State Highway and Transportation Officials [1993].
- “*Design of Pavement Structures*” Volume 2. American Association of State Highway and Transportation Officials [1993].
- *Diseño de Pavimentos (AASHTO-97)*. Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón [2000].
- “*Recomendaciones para el Diseño de Pavimentos en Chile Según AASHTO*”. Cámara Chilena de la Construcción. Corporación de Investigación de la Construcción. Abril 1997.
- “*State of Art and Practice in Rigid Pavement Design*”. Kathleen T. Hall. Committee on Rigid Pavement Design.
- “*Reliability of Pavement Structures using Empirical-Mechanistic Models*”. J. A. Prozzi, Ph.D.
- “*Pavimentos Flexibles Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias*”. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte. 1998.
- “*Review of Concrete Pavement Design*”. American Concrete Pavement Association (ACPA) (Presentación de Power Point)
- <http://training.ce.washington.edu>

[Pagina Principal](#)

E-mail: [uidv.contacto@mop.gob.sv](mailto:uidv.contacto@mop.gob.sv)