

## Análisis de la seguridad en el cálculo de espesores de refuerzo para pavimentos flexibles

MSc. Ing. Ernesto Zaldívar Serrano  
Profesor Auxiliar. Universidad de Camagüey, Cuba  
ernesto.zaldivar@reduc.edu.cu

Fecha de recepción: 29 de junio del 2007

Fecha de aprobación: 16 de noviembre del 2007

### Resumen

En el trabajo se analiza el uso del concepto de seguridad en el diseño de refuerzos de pavimentos flexibles; la opción más utilizada en los países latinoamericanos es el concepto de confianza del diseño, en especial el utilizado en el método AASHTO de las guías de 1986 y 1993. En el método se utiliza el nivel de confianza expresado en porcentaje y la desviación estándar general asociada a los datos del proyecto. En estas guías se hacen recomendaciones sobre el uso de estos elementos y que al no ser de pleno dominio por los proyectistas los puede conducir hacia diseños sobre o subdimensionados. En el trabajo se expone un procedimiento para el cálculo de la desviación estándar general del proyecto que permite utilizar factores de seguridad más racionales.

**Palabras clave:** refuerzo de pavimentos, confianza, factor de seguridad, guías AASHTO.

### Abstract

*The use of the concept of security is analyzed in the overlay design of flexible pavements; the option more used in the Latin American countries is the concept of reliability, especially the one used in the method AASHTO, guides of 1986 and 1993. In the method, the level of reliability expressed in percent is used and the general standard deviation associated with the data of the project. In these guides recommendations are made on the use of this general standard deviation and when the designers don't have full knowledge, it can lead to designs over or sub dimensioned. In this research, a procedure is proposed for the calculation of the general standard deviation of the project, which allows using more rational security factors.*

**Keywords:** pavements overlay, reliability, security factor, AASHTO guides.

### Introducción

El cálculo de los espesores de refuerzo es un tema de actualidad en muchos países del mundo, el mismo forma parte de los procedimientos para rehabilitar y extender la vida de numerosos pavimentos que en la actualidad evidencian síntomas de agotamiento o se manifiestan insuficientes para poder soportar las repeticiones del tránsito que se prevé circularán por los mismos en el futuro.

Como en todo cálculo de obra de ingeniería se requiere el análisis de varios factores de tipo técnico y económico. Dentro de estos elementos mencionados el factor de seguridad que se utilice juega un papel de mucha importancia, normalmente un mayor valor en la seguridad se traduce en un encarecimiento del valor inicial de la obra y viceversa. Entre dos variantes la de valor inicial más alto no necesariamente es la menos económica, ya que una correcta evaluación económica debe realizarse teniendo en cuenta los costos de mantenimiento y explotación. Es así que un refuerzo de mayor espesor puede requerir menor costo de mantenimiento y ser una mejor variante que otro calculado con menor seguridad.

En el presente trabajo se expone la opinión del autor sobre la forma en que debe tratarse el cálculo de la desviación estándar general del proyecto y no asumir valores extrapolados para la misma. En general, se recomienda el uso de la confianza del diseño para la introducción de factores de seguridad en el cálculo de refuerzos de pavimentos flexibles.

### Evaluación estructural de pavimentos existentes

Antes de decidir la necesidad de reforzar un pavimento en explotación se requiere la evaluación estructural del mismo, así es que cada procedimiento de cálculo de refuerzo conlleva un procedimiento de evaluación.

En la introducción de la guía de pavimentos del departamento de transporte del estado de Washington USA (WSdot), se indica que originalmente la evaluación de los pavimentos se hacía visualmente y por experiencia, y califica este procedimiento como inconsistente. Así la guía indica que sobre los años 50 del siglo XX, empezaron a aparecer sistemas más objetivos de evaluación. Entre los sistemas de evaluación, la guía considera la medición de deflexiones superficiales como la vía principal para evaluar estructuralmente un pavimento existente.

La evaluación a través de las deflexiones superficiales proporciona una gran cantidad de datos debido a la longitud que normalmente se estudia, de manera que se hace imprescindible el manejo estadístico de esa información. Ejemplo de este tipo de manejo es la llamada deflexión, característica utilizada en el procedimiento del Manual MS-17 del Instituto de Asfalto y en el de la orden circular sobre Rehabilitación de Firmes de España.

### Concepto de confianza del diseño

El concepto de deflexión característica mencionado anteriormente conlleva un determinado nivel de confianza, que se introduce en el coeficiente que multiplica a la desviación estándar de las mediciones de las deflexiones y que posteriormente el producto se adiciona al valor de la deflexión media.

En el caso de la instrucción española se indica en el Anexo 3. "El coeficiente 2 que figura en la expresión de  $d_k$  (deflexión característica) equivale a una probabilidad del 97.5 % de que la deflexión característica no sea sobrepasada en el tramo".

En otras palabras, se puede decir que existe una confianza de que el refuerzo calculado con esta deflexión será suficiente o superará al necesario en el 97.5 % de las secciones del tramo homogéneo que se analiza.

Existen varias definiciones de confianza en la literatura de diseño y rehabilitación de pavimentos, el concepto de confianza se introdujo en la versión de la Guía AASHTO de 1986 y se catalogó como uno de los logros reconocidos de esa guía. En la versión de 1993 se recogen las siguientes definiciones del concepto de confianza del diseño:

"Es la probabilidad de que el pavimento cumplirá la función prevista durante su vida de diseño bajo las condiciones de medio ambiente encontradas durante la operación."

"Es la probabilidad de que un tipo particular de daño (o combinación de manifestaciones de daños), permanezcan debajo de los niveles permisibles durante la vida de diseño."

"Es la probabilidad de que una sección de pavimento, diseñada según un procedimiento de diseño basado en el comportamiento<sup>1</sup>, se comportará satisfactoriamente

bajo las condiciones de tránsito y medio ambiente, durante el período de diseño."

En el caso que se aborda del refuerzo de pavimentos, se calcula un espesor de refuerzo que se construirá de forma uniforme a lo largo del tramo, en aquellas secciones que tengan una deflexión mayor que la característica (el 2.5% del tramo si se utiliza el coeficiente 2 mencionado), existirá la posibilidad de que las mismas fallen antes de que se llegue al período de diseño, el total de secciones falladas será el área total deteriorada al final del período mencionado. El resto de las secciones sobrevivirán el período de diseño y la probabilidad que tenga una determinada sección cualquiera de llegar a sobrevivir ese período de tiempo se denomina confianza.

Según la guía WSdot anteriormente mencionada hay tres razones importantes para el uso del concepto de confianza:

1. Posibilita al proyectista incorporar la variabilidad de los datos en el diseño.
2. Incorpora cierto grado de seguridad en el diseño.
3. Permite una mejor base de comparación de variantes de diseño entre pavimentos rígidos y flexibles.

### Uso del concepto de confianza en la Guía AASHTO 1993

Uno de los procedimientos más apropiado en el uso del concepto de confianza es el utilizado en la mencionada Guía AASHTO de 1993, esta guía ha tenido y tiene un uso muy difundido entre los especialistas de pavimentos de los países latinoamericanos. "El concepto de confianza de diseño ha sido utilizado por muchos años, y ha cobrado mayor vigencia con el uso de los métodos Analíticos Experimentales" (Chadbourne, 2001).

En el conocido ábaco de diseño de esta guía se parte de un determinado nivel de confianza que se recomienda según el tipo de vía y una desviación estándar general que tiene rango de valores recomendados entre 0.4 y 0.5 para pavimentos flexibles. Es importante señalar que aunque en la propia guía se aclara que existe un apéndice en el que se indica el procedimiento para que el usuario pueda desarrollar según sus condiciones específicas sus cálculos de varianza o desviación estándar general, la mayoría de los proyectistas utilizan

1. En la guía se refiere al diseño basado en el comportamiento, (performance based design).

**Tabla 1** Niveles de confianza recomendados según AASHTO

Fuente guía WSdot. Volumen II. Página 5.47		
Clasificación funcional	Urbanas	Rurales
Interestatales y otras vías expresas	85 a 99,9	80 a 99.9
Arterias principales	80 a 99	75 a 95
Colectoras	80 a 95	75 a 95
Locales	50 a 80	50 a 80

**Tabla 2** Niveles de confianza recomendados según WSdot

Fuente guía WSdot. Volumen II. Página 5.58	
Clasificación funcional	Nivel de confianza
Sistema interestatal	95%
Arterias principales	85%
Arterias secundarias y colectoras	75%

estos rangos que están basados en las observaciones de carreteras de los Estados Unidos. Esta práctica puede conllevar a diseños sobre o subdimensionados en dependencia de cuan cerca esté la dispersión de los datos, del valor asumido. Esta afirmación es de mayor importancia en los proyectos donde no estén claramente definidos los tramos homogéneos.

#### Relación entre el nivel de confianza y la seguridad

En el texto del profesor Huang "Pavement Analysis and Design" se dedica un capítulo a la confianza del diseño y entre otros aspectos a su relación con el factor de seguridad, según el autor existen dos vías para fijar los factores de seguridad:

1. El uso de diferentes factores de seguridad asignados por el proyectista en función de la incertidumbre de los datos y de acuerdo a la incidencia de los diferentes factores en el diseño.
2. El análisis estadístico de los datos captados que intervienen en el diseño para obtener los valores medios y las varianzas, con estos valores se puede fijar la confianza del diseño.

Como se observa hay una íntima relación entre los conceptos de confianza del diseño y de factor de seguridad, en el procedimiento de la guía AASHTO 1993, se calcula el denominado "factor de confianza",

que analizado en detalle no es más que un factor de seguridad. La expresión utilizada en esta guía para el cálculo del factor de confianza Fr es:

$$Fr = 10^{Zr \cdot So} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde Zr es el valor de la variable estandarizada de la distribución normal y So la desviación estándar general.

En la mencionada Guía AASHTO 1993 se expresa: "En todo procedimiento de diseño está implícito algún nivel de confianza. Cada método hace posible diseñar a una confianza dada en función de los valores que se introduzcan en las ecuaciones. Si en la ecuación de diseño se introducen los valores medios sin ningún elemento de seguridad la confianza del diseño es del 50 %." Podría decirse de otra forma que si el factor de seguridad es igual a uno, el nivel de confianza es del 50 %.

#### Influencia en el diseño del nivel de confianza asumido

Como se ha explicado anteriormente la guía AASHTO propone valores de confianza de acuerdo a la clasificación funcional de las vías. De la misma manera la guía WSdot indica valores que deben tenerse en cuenta en los proyectos de ese estado (Tablas 1 y 2).

La selección del nivel de confianza es un asunto de gran importancia, en la Tabla 3 se relacionan los valores de la variable estandarizada de la distribución normal de acuerdo al nivel de confianza, y los valores del factor Fr para una desviación estándar general So de 0.5, valor que es recomendado por varias instituciones.

Como se deduce de la Tabla 3, en el caso que se utilizasen las repeticiones esperadas por el tránsito como factor de diseño, aumentar la confianza del 50 al 75 % implicaría multiplicar por 2.17 las mencionadas repeticiones y para llegar al 90 % de confianza multiplicar por 4.38.

Vista la importancia económica que implica la adopción de un determinado nivel de confianza en el diseño, no es necesario mencionar el cuidado que debe tenerse en esta elección. Una vez que se ha fijado apropiadamente la confianza, que es decir el valor de la variable Zr, el otro elemento que influye en el factor de confianza Fr y en el espesor final es la desviación general So. Como se ha mencionado este valor es recomendado en las guías y generalmente adoptado por los proyectistas.

Una variante más apropiada para obtener la desviación estándar general So aparece en el texto "Pavement Analysis and Design" anteriormente mencionado. La expresión utilizada por el profesor Huang para el cálculo de la varianza V parte de un desarrollo en series de Taylor.

$$V(g) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2 * V(x_i)$$

Ecuación 2

Donde g es la función que caracteriza el diseño y xi cada una de las variables independientes que intervienen en el diseño, y de las que depende g.

En el presente trabajo se utiliza como función de diseño, la relación entre las repeticiones pronosticadas del tránsito y las repeticiones que puede soportar el pavimento antes de llegar a un estado tal de deterioro que haría antieconómico su refuerzo, debiéndose entonces acometer su reparación capital. Esta relación se conoce como razón de deterioro RD.

Es aconsejable cuando se trabaja con repeticiones del tránsito que pueden variar en grandes órdenes de magnitud utilizar la función expresada en su forma logarítmica. Se tiene entonces:

$$RD = \frac{Nt}{Np}$$

Ecuación 3

$$\log RD = \log Nt - \log Np$$

Ecuación 4

$$V(\log RD) = V(\log Nt) + V(\log Np)$$

Ecuación 5

Donde Nt y Np son las repeticiones pronosticadas del tránsito y las que puede soportar el pavimento en un período de tiempo dado. Los valores V(log RD), V(log Nt) y V(log Np) son las varianzas de cada uno de los términos que intervienen.

Una vez calculada la varianza de la razón de deterioro V(log RD), su raíz cuadrada será la desviación estándar general del proceso (So).

Nivel de confianza	Valor de Zr	Valor de Fr	Nivel de confianza	Valor de Zr	Valor de Fr
50	0,000	1,00	90	1,282	4,38
75	0,674	2,17	95	1,645	6,65
85	1,037	3,30	99	2,327	14,57

Procedimiento propuesto para el análisis de la confianza en refuerzos

En el cálculo del valor de la razón de deterioro, si RD > 1, es necesario reforzar el pavimento ya que se sobreentiende que el mismo no podrá soportar el tránsito previsto en el período de diseño analizado.

Lógicamente al colocarse un espesor dado de refuerzo, el pavimento será capaz de soportar un número adicional de repeticiones (repeticiones asociadas al pavimento reforzado Npr) antes de llegar al fallo y caben dos posibilidades:

1. Si Npr = Nt, RD = 1 y el factor de seguridad toma el valor de uno y la confianza será del 50 %.
2. Si Npr > Nt, RD < 1 y el factor de seguridad será mayor que uno y la confianza mayor del 50 %.

De esta forma el proyectista puede manejar la seguridad y la confianza en su diseño.

En la Norma Cubana NC 334. 2004. Pavimentos flexibles. Método de Cálculo aparecen las expresiones necesarias para el cálculo de los logaritmos de ambas repeticiones.

Primero se indica en la norma que:

$$Nt = 365 * ICD * Kr * fce$$

Ecuación 6

Donde ICD es la intensidad diaria de camiones en el carril de diseño, Kr es una constante una vez que se admite una razón de crecimiento anual y fce es el factor camión eje obtenido por campañas de pesaje en la vía. En la expresión los valores de ICD y fce son variables en dependencia de la cantidad de conteos y pesajes que se tengan, por lo que dan origen a datos estadísticos, es decir promedios, desviaciones y varianzas. Aplicando logaritmos en la ecuación 6 se tiene:

$$\log Nt = \log 365 + \log ICD + \log Kr + \log fce$$

Ecuación 7

El espesor del pavimento expresado como base granular equivalente se calcula por la expresión empírica:

$$T = (25,96 \log N - 89,88) * \left[ \frac{5}{CBR} \right]^{0,4}$$

#### Ecuación 8

Donde  $T$  es el espesor (en cm) equivalente de material granular de módulo 500 MPa y  $CBR$  la resistencia de la subrasante. El valor  $N$  representa las repeticiones de la carga de cálculo.

Para el caso de un nuevo diseño  $N = Nt$ , pero en el caso que se analiza de un pavimento existente, si se pudiera determinar in situ el valor del espesor  $T$ , entonces,  $N = Np$  es decir  $Np$  serían las repeticiones que estarían asociadas a la estructura resistente del pavimento, o las repeticiones que el mismo podría resistir.

Para poder calcular  $T$ , primero se debe determinar el valor del módulo del conjunto del pavimento, esto se realiza por cálculo inverso a partir de mediciones de deflexiones, luego utilizando las transformaciones de Odermark se tendría:

$$T = h_1 * \sqrt[3]{\frac{Ep}{500}}$$

#### Ecuación 9

Donde  $h_1$  (cm) es el espesor de la estructura del pavimento y  $Ep$  (MPa) el módulo del conjunto de la estructura del pavimento.

Sustituyendo la expresión 7 en la expresión 6 y despejando el valor del  $\log Np$ .

$$\log Np = \left[ \frac{h_1 * \sqrt[3]{\frac{Ep}{500}} * \left( \frac{CBR}{5} \right)^{0,4} + 89,88}{25,96} \right]$$

#### Ecuación 10

En la expresión anterior  $Ep$  y  $CBR$  son variables en cada una de las secciones donde se hagan las mediciones de deflexiones y dan origen a valores estadísticos.

Después de realizar las derivadas parciales de las ecuaciones 7 y 10 para calcular sus varianzas y sustituir éstas en la ecuación 5 la expresión final es la siguiente:

$$V(\log RD) = \frac{0,18861}{ICD^2} * V(ICD) + \frac{0,18861}{fce^2} * V(fce) + (1,039 * 10^{-6} * h_1^2 * Ep^{0,6667} * CBR^{1,2}) * V(CBR) + (7,22 * 10^{-7} * h_1^2 * Ep^{-1,3333} * CBR^{0,8}) * V(Ep)$$

#### Ecuación 11

Según el profesor Huang en este tipo de expresión se sustituyen los valores medios de las diferentes variables y las varianzas de las mismas se obtienen de las series de mediciones realizadas en el campo.

#### Aplicación del procedimiento

A continuación se aplica el procedimiento anteriormente descrito en el análisis del refuerzo de un tramo de 2 km de la carretera de Circunvalación Norte de la ciudad de Camagüey. Para el análisis se cuenta con todos los datos necesarios para el cálculo de la desviación estándar general.

#### Datos de tránsito.

ICD = 232 camiones por día en el carril de diseño.  
 Coeficiente de variación de las series de conteos = 0.21  
 Desviación estándar = 48.7 y Varianza = 2373.6  
 Fce = 0.47 ejes de 100 kN por vehículo pesado.  
 Coeficiente de variación de series de pesajes indirectos = 0.27  
 Desviación estándar = 0.127 y Varianza = 0.0161  
*Datos del pavimento existente, obtenidas por cálculo inverso utilizando el sistema de línea de influencia en las mediciones con Viga Benkelman cada 40 metros.*  
 Espesor total del pavimento = 58 cm  
 CBR promedio = 4.7 %  
 Varianza del CBR = 1.27 %  
 Módulo E del pavimento = 398 MPa  
 Varianza del módulo del pavimento = 2279.5 MPa  
 Al sustituir todos los valores en la ecuación 11 se obtiene el valor:  $V(\log RD) = 0.07879$  y la desviación estándar general  $So = 0.2807 < 0.5$  valor que se asume frecuentemente.

En la Tabla 4 se repone la tabla anteriormente analizada (3) de la confianza y del valor del factor  $Fr$ , pero en la misma se han introducido las repeticiones del eje de cálculo que se usarían en el diseño con la desviación estándar general asumida y la calculada.

Como se observa de los resultados expresados en la tabla 4, el hecho de asumir la desviación estándar general puede originar cambios sustanciales en los resultados del diseño del refuerzo, y la diferencia se hace mayor en la medida que se utilicen niveles de confianza mayores como en el caso de las vías principales de la red.

En el caso que se ha utilizado como ejemplo, la desviación estándar general calculada fue menor que 0.5, pero no se descarta el caso de que se obtuviesen resultados mayores en proyectos de mayor dispersión en los datos de campo, obteniéndose entonces resultados contrarios.

### Conclusiones

En los proyectos de rehabilitación de carreteras existentes, tanto en el caso de refuerzos como de reconstrucción, donde se toman informaciones a lo largo del trazado se obtienen una gran cantidad de datos que lógicamente tienen un determinado grado de dispersión. Aún después de la división del proyecto en tramos homogéneos, siguen encontrándose estas características. Esta dispersión requiere el análisis estadístico de la información obtenida.

En proyectos viales se ha utilizado por más de 20 años el concepto de confianza del diseño, el mismo tiene innegables ventajas en el tratamiento de la información y en la forma de manejar la seguridad integral del proyecto.

El método más difundido entre los especialistas del ramo es el de la guía de diseño AASHTO, en el mismo se utiliza un factor de confianza que es función del nivel de confianza que se desee obtener y de la desviación estándar general, que es una medida de la dispersión de los datos obtenidos.

Los cálculos realizados en el artículo demuestran la importancia de ser muy cuidadosos en el momento de seleccionar la confianza que se asignará al proyecto. A falta de estudios económicos existen indicaciones de los organismos con mayor experiencia.

Para la desviación estándar general se acostumbra a utilizar valores entre 0.4 y 0.5. Estos valores pueden estar del lado seguro pero también pueden introducir espesores sobre diseñados. Por esto se recomienda siempre que exista la información para calcular dicha desviación, sobre todo en aquellos proyectos en los que se han asumido valores altos de la confianza.

Nivel de confianza	Valor de Z	Valor de Fr So = 0,5 (Estimado)	Ejes esperados en 12 años	Valor de Fr So = 0,2807 (Calculado)	Ejes esperados en 12 años
50	0,000	1,00	397 996	1,00	397 996
75	0,674	2,17	863 651	1,56	620 874
85	1,037	3,30	1 313 387	1,95	776 092
90	1,282	4,38	1 743 222	2,33	927 331
95	1,645	6,65	2 646 673	2,97	1 182 048
99	2,327	14,57	5 798 801	4,66	1 854 661

### Referencias bibliográficas

1. American Association of State and Transportation Officials. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1993. 444N. Capitol Street, N. W., Washington, D.C. 20001. Traducción del Instituto para el Desarrollo de los Pavimentos en el Perú. Lima. Parte I. 102 páginas y Parte II. 63 páginas. 1997.
2. Chadborn B. A. Development of a Quick Reliability Method for Mechanistic-Empirical Asphalt Pavement Design. 17 páginas. 2001. Documento en PDF en [http://mnroad.dot.state.mn.us/research/mnroad\\_project/restools/mnpave/files/mnpave\\_reliability.pdf](http://mnroad.dot.state.mn.us/research/mnroad_project/restools/mnpave/files/mnpave_reliability.pdf)
3. Huang, Y.H. Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, New Jersey, USA. 84 páginas. 1993.
4. WSDOT. WSDOT Pavement Guide, Volume 2, Pavement Notes for Design, Evaluation and Rehabilitation, section 7-1-5, Washington State Department of Transportation, USA. 1995.