

ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO CON REFUERZO CONTINUO

STOCHASTIC ANALYSIS OF CONTINUOUSLY REINFORCED CONCRETE PAVEMENTS

Fecha de recepción: 19 de mayo de 2014

Fecha de aprobación: 16 de julio de 2014

Ing. Fabricio Leiva Villacorta, PhD.
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR)
Costa Rica
fabricio.leiva@ucr.ac.cr

Ing. Adriana Vargas Nordbeck, PhD.
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR)
Costa Rica
adriana.vargasnordbeck@ucr.ac.cr

RESUMEN

Los pavimentos de concreto con refuerzo continuo son pavimentos de concreto reforzados longitudinalmente con barras de acero y construidos sin el corte de juntas transversales de contracción. En este pavimento resulta importante controlar el espaciamiento de grietas, ancho de grietas y nivel de esfuerzos en el acero a manera que se mantengan dentro de ciertos límites que garanticen el buen desempeño del pavimento.

La consideración de la variabilidad de las propiedades de los materiales y la variabilidad en el espesor de la losa mediante un análisis estocástico puede servir al proceso de optimización del diseño y la reducción de la incertidumbre. Los objetivos de este estudio son el de evaluar la metodología de diseño de pavimentos de concreto con refuerzo continuo usando un análisis probabilístico y evaluar la variabilidad de los parámetros de diseño: espaciamiento de las grietas, el ancho de las grietas y el esfuerzo en el acero. Para esto, se incorporó la variabilidad de las propiedades de los materiales y la variabilidad en el espesor de la losa mediante la metodología de simulación de Monte Carlo para un caso de estudio.

PALABRAS CLAVES: análisis estocástico, pavimentos rígidos, refuerzo continuo, simulación de Monte Carlo.

ABSTRACT

Continuously reinforced concrete pavements are rigid pavements that are reinforced with steel bars in the longitudinal direction and are built without transverse joints. In this type of pavements it is important to control crack spacing and width, as well as the stress level in the steel bars so that these parameters remain within a range that will ensure good pavement performance.

Considering variability of material properties and slab thickness through a stochastic analysis may help optimize the design process and reduce

uncertainty. The objectives of this study were to evaluate the design methodology for continuously reinforced concrete pavements using a probabilistic analysis and to evaluate the variability of the design parameters: crack spacing, crack width and steel stress. To accomplish these objectives, the variability of the material properties and slab thickness was included through the Monte Carlo simulation method for a case study.

KEY WORDS: *stochastic analysis, rigid pavements, continuous reinforcement, Monte Carlo simulation.*

INTRODUCCIÓN

En pavimentos de concreto con refuerzo continuo el refuerzo asume todas las deformaciones y específicamente las de temperatura, con lo cual se eliminan las juntas de contracción. En este tipo de pavimento, se permite que el concreto se agriete en forma aleatoria como resultado de cambios de volumen derivados de variaciones de temperatura y humedad. Sin embargo, el agrietamiento se controla mediante el refuerzo de acero y la restricción de la capa de base a manera de que se mantenga la transferencia de carga y la integridad del pavimento. Las grietas en este tipo de pavimento aparecen típicamente cada 1.1 a 2.4 m (3.5 a 8 pies) (Huang 2004) y se mantienen controladas gracias a una armadura de acero continua en el medio de la calzada, diseñada para garantizar el buen comportamiento de la estructura del pavimento

Las variables que controlan el diseño de pavimentos de concreto con refuerzo continuo son: el espaciamiento de las grietas, el ancho de las grietas y el esfuerzo en el acero. Estas variables deben ser controladas para optimizar los recursos y el desempeño de la estructura de pavimento. La consideración de la variabilidad de las propiedades de los materiales y la variabilidad en el espesor

de la losa mediante un análisis estocástico puede servir al proceso de optimización del diseño y la reducción de la incertidumbre.

Una de las metodologías más comunes para análisis de variabilidad y confiabilidad es la simulación de Monte Carlo (Harr, 1987). Esto implica reproducir artificialmente cada distribución probabilística de la variable de entrada, introduciendo los valores en la función, y la obtención de la distribución de salida. La principal ventaja de este método es que se determina la distribución de probabilidad completa de la variable aleatoria dependiente. En pavimentos, esta metodología ha sido incorporada en la evaluación de la variabilidad en espesores de capa (Laszlo, 2012), en diseño de pavimentos flexibles (Timm y otros, 1999) y desempeño de pavimentos flexibles (Lu y otros, 2003). Una de las más recientes y reconocidas aplicaciones de la metodología Monte Carlo se encuentra en la Guía Mecánica-Empírica MEPDG (ARA Inc., 2004) la cual incorpora el análisis de variabilidad y determina la confiabilidad del diseño y desempeño de la estructura de pavimento.

Objetivo

Los objetivos de este estudio son el de evaluar la metodología de diseño de pavimentos de concreto con refuerzo continuo usando un análisis probabilístico y evaluar la variabilidad de los parámetros de diseño: espaciamiento de las grietas, el ancho de las grietas y el esfuerzo en el acero.

Alcance

Para cumplir con el objetivo de este estudio se consideró una incorporación de la variabilidad de las propiedades de los materiales y la variabilidad en el espesor de la losa mediante la metodología de simulación de Monte Carlo. Inicialmente se consideró un escenario con datos de entrada para evaluar los parámetros de diseño a nivel determinístico. Finalmente, con el análisis probabilístico se determinó la probabilidad de falla, el nivel de confianza y el ajuste en el espesor de losa para optimizar el diseño de la estructura.

METODOLOGÍA

Simulación de Monte Carlo

La simulación de Monte Carlo es una técnica que combina conceptos estadísticos (muestreo aleatorio) con la capacidad que tienen los ordenadores para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos (Samik, 2008). Para este caso la metodología se utilizó para simular la variabilidad en las propiedades de varios materiales.

Un generador de números variables fue utilizado para el cálculo de variable aleatorias utilizando la metodología de Box & Muller (1958). Las ecuaciones 1 y 2 definen las variables aleatorias independientes con una distribución normal con desviación típica 1.

$$S_1 = \sqrt{-2\ln(U_1)} \cdot \cos(2\pi U_2) \quad (1)$$

$$S_2 = \sqrt{-2\ln(U_1)} \cdot \sin(2\pi U_2) \quad (2)$$

donde U_1 y U_2 son números aleatorios

Para variables con distribución normal, se utilizaron las ecuaciones 3 y 4 para generar variables aleatorias normalmente distribuidas.

$$X_a = \mu_a + \sigma_a S_1 \quad (3)$$

$$X_b = \mu_b + \sigma_b S_2 \quad (4)$$

donde

μ = promedio de la variable

σ = desviación estándar de la variable

Para variables con distribución lognormal, el promedio y la desviación estándar fueron convertidos al espacio logarítmico con las ecuaciones 5 y 6.

$$\sigma_y = \sqrt{\ln\left[\left(\frac{\sigma_x}{\mu_x}\right)^2 + 1\right]} \quad (5)$$

$$\mu_y = \ln(\mu_x) - \frac{\sigma_y^2}{2} \quad (6)$$

donde

μ_y = promedio en espacio log

σ_y = desviación estándar en espacio log

Variables aleatorias independientes S_3 y S_4 también obtenidas de las ecuaciones 1 y 2 fueron utilizadas para generar variables aleatorias lognormales por medio de las ecuaciones 7 y 8.

$$X_c = e^{\mu_y + \sigma_y S_3} \quad (7)$$

$$X_d = e^{\mu_y + \sigma_y S_4} \quad (8)$$

donde

μ_y = promedio en espacio log

σ_y = desviación estándar en espacio log

Estas ecuaciones fueron utilizadas para producir valores que representan la variabilidad de espesor de la losa, módulo de reacción de la subrasante, módulo del concreto y el coeficiente térmico del concreto.

Ecuaciones de análisis

La Figura 1 muestra parte de los parámetros críticos de diseño de pavimentos con refuerzo continuo. Para este tipo de pavimento se espera que se generen grietas de contracción térmica que se controlan y diseñan para que tengan un espaciamiento y un ancho definidos. El espaciamiento entre grietas se controla para minimizar el escalonamiento y el desprendimiento del concreto. Se diseña para que las grietas tengan una separación máxima de 2.4 m (8 pies) y una separación mínima de 1.1 m (3.5 pies).

El ancho de las grietas se controla para minimizar el escalonamiento y evitar la penetración de agua relacionado con el bombeo de finos. El ancho máximo de grieta permisible es de 1.0 mm (0.04 pulg). Finalmente, el esfuerzo en el refuerzo de acero se controla para prevenir deformaciones plásticas (Huang 2004) mediante una limitación del esfuerzo aplicado del 75% del esfuerzo último a tensión del acero. Las ecuaciones 9 a 11 se utilizan para calcular el espaciamiento de grietas, ancho de grietas y el esfuerzo aplicado en el acero.

Espaciamiento de grieta

$$\bar{X} = \frac{1.32 \left(1 + \frac{f_t}{1000}\right)^{6.70} \left(1 + \frac{\alpha_s}{2\alpha_c}\right)^{1.15} (1 + \phi)^{2.19}}{\left(1 + \frac{\sigma_w}{1000}\right)^{5.20} (1 + P)^{4.60} (1 + 1000Z)^{1.79}} \quad (9)$$

Ancho de Grieta

$$CW = \frac{0.00932 \left(1 + \frac{f_t}{1000}\right)^{6.53} (1 + \phi)^{2.20}}{\left(1 + \frac{\sigma_w}{1000}\right)^{4.91} (1 + P)^{4.55}} \quad (10)$$

Esfuerzo en Acero

$$\sigma_s = \frac{47300 \left(1 + \frac{f_t}{1000}\right)^{4.09} \left(1 + \frac{\Delta T}{100}\right)^{0.425}}{\left(1 + \frac{\sigma_w}{1000}\right)^{3.14} (1 + P)^{2.74} (1 + 1000Z)^{0.494}} \quad (11)$$

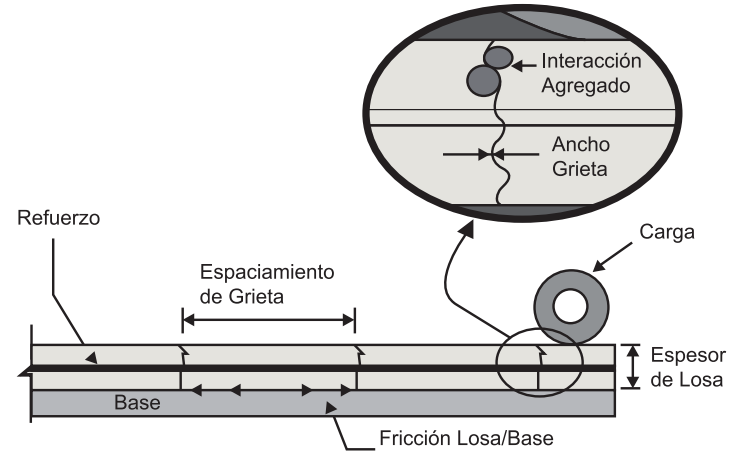


Figura 1. Elementos críticos de diseño.

donde

f_t = Esfuerzo a tensión a los 28 días del concreto, psi

α_s/α_c = razón entre coeficiente térmico del acero y el coeficiente térmico del concreto (5×10^{-6} pulg/pulg/°F)

ϕ = diámetro de la barra de acero, pulg

σ_w = esfuerzo vertical de la carga aplicada, psi

P = cantidad de acero transversal como porcentaje de la sección transversal de la losa, %

Z = Coeficiente de contracción del concreto

ΔT = caída de temperatura (entre temperaturas máximas y mínimas esperadas), °F

El esfuerzo a tensión del concreto fue calculado utilizando el 86% del módulo de ruptura (1). El módulo de ruptura fue calculado utilizando la ecuación 12.

$$S_C = \frac{43.5E_c}{10^6} + 488.6 \quad (12)$$

donde

S_c = Modulo de ruptura, psi

E_c = Módulo del concreto, psi

El esfuerzo aplicado por la carga de tránsito se calculó utilizando la ecuación de Westergaard para cargas internas en la losa (Ecuación 13):

$$\sigma_w = \frac{0.316P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{1}{b} \right) + 1.069 \right] \quad (13)$$

donde

σ_w = esfuerzo vertical de la carga aplicada, psi

a = radio de contacto, pulg

h = espesor de la losa, pulg

l = radio de rigidez, pulg

$b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h$ si $a < 1.724h$, de otra forma $b=a$

El esfuerzo aplicado en el acero depende de la resistencia a la tensión indirecta del concreto y del tamaño de la barra de refuerzo. La Figura 2 muestra la relación entre esfuerzo permitido para el acero y resultados de tensión indirecta del concreto para una barra N° 5. Adicionalmente, para calcular el coeficiente de contracción del concreto, se estableció su relación con la tensión indirecta del concreto como se muestra en la Figura 3.

EJEMPLO DE ANÁLISIS

El siguiente escenario (Tabla 1) muestra los resultados de una estructura de pavimento rígido con refuerzo continuo diseñado previamente utilizando la metodología AASHTO 93. El proyecto se diseñó para la carretera Interestatal I-80 en Nebraska. Los datos de temperatura fueron obtenidos del sitio web de "High Plains Regional Climate Center" (HPRCC 2006). Con esta información se determinó que la temperatura alta promedio fue de 87 °F (30.1 °C) y que la temperatura baja promedio fue de 11 °F (11.7 °C), lo cual resulta en una caída de temperatura de 76 °F (24.4 °C).

La metodología de diseño involucra el cálculo del espesor de la losa para resistir las cargas de diseño y el cálculo del contenido de acero longitudinal obtenido de las ecuaciones 9 a 11. El contenido de acero de diseño se obtuvo a partir del valor máximo calculado para las 3 condiciones críticas, que además fuera mayor a 0.4%. En este caso este valor corresponde al parámetro esfuerzo aplicado en el acero por lo que se determinó como parámetro dominante del diseño. Además, el espesor de losa obtenido fue de 8.0 pulgadas (20.3 cm) con un porcentaje de acero longitudinal de 0.535% y se utilizó barras de acero #5 (diámetro de 5/8 pulg).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis inició con la determinación de la aceptabilidad del diseño aplicando las ecuaciones 9 a 11. La Tabla 2 muestra los valores de entrada y los resultados del análisis determinístico del diseño. Con esta información se verificó que el diseño era adecuado para resistir los esfuerzos aplicados según la metodología de diseño utilizada.

El siguiente paso en el análisis fue la evaluación de la variabilidad en valores de entrada cuantificables como el espesor de la losa, el módulo de reacción de la subrasante, el módulo del concreto y el coeficiente térmico del concreto. La Tabla 3 muestra los coeficientes de variabilidad para estas 4 variables al igual que su respectiva distribución estadística.

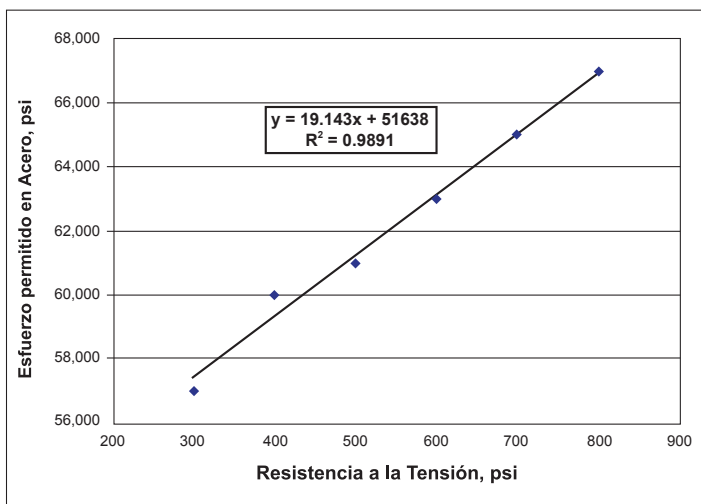


Figura 2. Esfuerzo permitido para barras de acero N° 5. (Huang 2004).

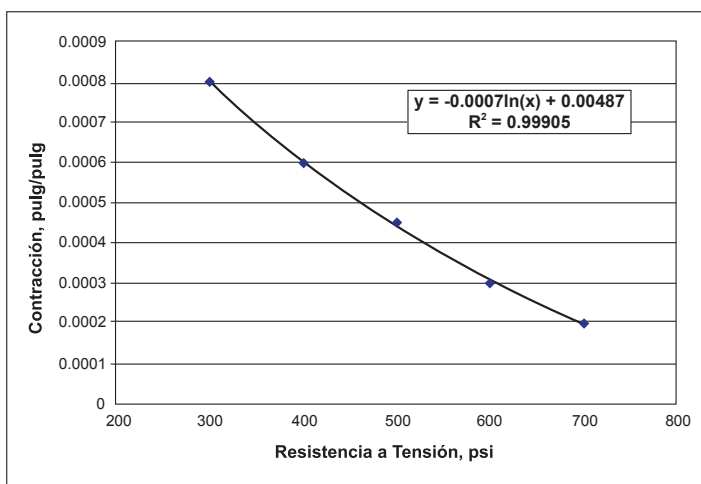


Figura 3. Relación entre deformación por contracción y resistencia a la tensión del concreto. (Huang 2004).

Tabla 1. Escenario de Diseño

Parámetro	Valor promedio	Variabilidad, COV% (Distribución)
Ubicación	I-80 Kearney, Nebraska	--
Espesor de Losa	8 pulg (20.3 cm)	5 % (Normal)
Módulo de reacción subrasante	200 pci	40 % (Lognormal)
Carga de diseño	6 000 lb (26.6 kN), 100 psi (690 kPa)	--
Módulo del Concreto	3 000 000 psi (20.7 GPa)	15 % (Lognormal)
Coefficiente térmico del Concreto	$6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$	10 % (Normal)
Porcentaje de Acero	0.535 %	--
Tamaño de Barra	# 5	--
Coefficiente térmico del Acero	$5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$	--

Tabla 2. Análisis determinístico del diseño

Valores de entrada			Valores Estimados			
			Espaciamiento de grietas	Ancho de grietas	Esfuerzo aplicado	Esfuerzo permitido
ΔT_D	76	$^{\circ}\text{F}$	3.98 pies (1.21 m)	0.0346 pulgadas (0.88 mm)	61 402 psi (423.4 MPa)	61 829 psi (426.3 MPa)
h	8	pulg				
k	200	pci				
Carga	6,000	lb				
q	100	psi				
E_c	3,000,000	psi				
α_c	6.0E-06	$/^{\circ}\text{F}$				
P	0.535	%				
ϕ	0.625	pulg				
α_s	5.0E-06	$/^{\circ}\text{F}$				
l	28.45	pulg				
a	4.37	pulg				
b	4.32	pulg				
σ_w	128.62	psi				
S'_c	619.0	psi				
f_t	532.3	psi				
z	0.00041	pulg/pulg				

La metodología de simulación de Monte Carlo con 2 000 ciclos se utilizó para determinar distribuciones estadísticas de los parámetros de respuesta críticos. Se determinó que 2 000 ciclos de simulación eran suficientes para obtener distribuciones representativas y para estabilizar los valores promedio de las variables respuesta. Como se ejemplifica en la Figura 4, el promedio del espaciamiento de las grietas tiende a estabilizarse para una cantidad de ciclos cercana a los 1 000 ciclos. Aun así se llevó el análisis a 2 000 ciclos para mejorar la definición de las distribuciones tanto de las variables de entrada como las variables respuesta. Adicionalmente, en la Tabla 4 se muestran los valores promedio y desviación estándar de la simulación para todas las variables y para los 3 parámetros de diseño.

Tabla 3. Variabilidad de parámetros evaluados

Valores de entrada			COV		σ	σ_y	μ_y
h	8	pulg	5%	Normal	0.4		
k	200	pci	40%	Lognormal	80	0.39	5.22
E_c	3 000 000	psi	15%	Lognormal	450 000	0.15	14.90
α_c	6.0E-06	$/^{\circ}\text{F}$	10%	Normal	6E-07		

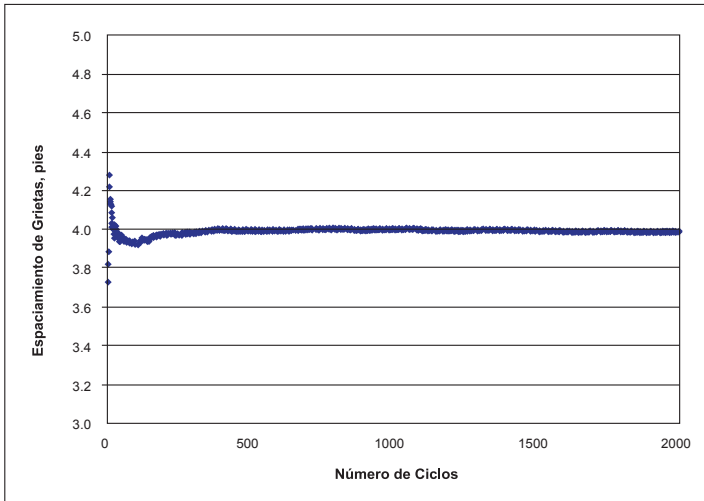


Figura 4. Media móvil para 2 000 ciclos de espaciamiento de grietas.

Otra forma de verificar la simulación de la variabilidad de las variables de entrada es por medio de su distribución por frecuencia y frecuencia acumulada. La Figura 5 muestra tales distribuciones para la variable espesor de losa. Como se esperaba tiene una distribución normal con valores promedio y media de 8.0 pulg.

Los resultados de la simulación de los parámetros críticos de diseño para 2 000 ciclos y utilizando 0.535% de acero se muestran en la Tabla 5. De aquí se puede obtener lo siguiente:

- Se espera que el espaciamiento promedio sea de 3.99 pies (1.22 m) y la probabilidad de obtener espaciamientos de grietas dentro del rango establecido (3.5 a 8.0 pies) es de 86.9%.
- Se espera que en promedio las grietas sean de 0.035 pulg (0.89 mm) de ancho y la probabilidad de obtener anchos de grieta menores a 0.04 pulg es de 100%.

Tabla 4. Resumen de la simulación de las variables de entrada

Valores de diseño		h	α_c	k	E_c	l	b	σ_w	f_t	z
Espac. de grietas	Promedio	8.0	6.0E-06	202.0	299 807	29.0	4.33	130.0	532.3	4.1E-04
	Des. Est.	0.40	6.1E-07	83.7	456 805	3.3	0.06	13.1	17.1	2.3E-05
Ancho de grietas	Promedio	8.0	6.0E-06	200.3	3 003 931	29.1	4.33	129.8	532.5	NA
	Des. Est.	0.40	6.0 E-07	80.9	440 799	3.2	0.06	12.8	16.5	NA
Esfuerzo en Acero	Promedio	8.0	6.0E-06	199.8	2 986 972	29.0	4.33	130.4	532.3	4.1E-04
	Des. Est.	0.40	5.8E-07	79.1	452 891	3.2	0.06	13.1	16.9	2.2E-05

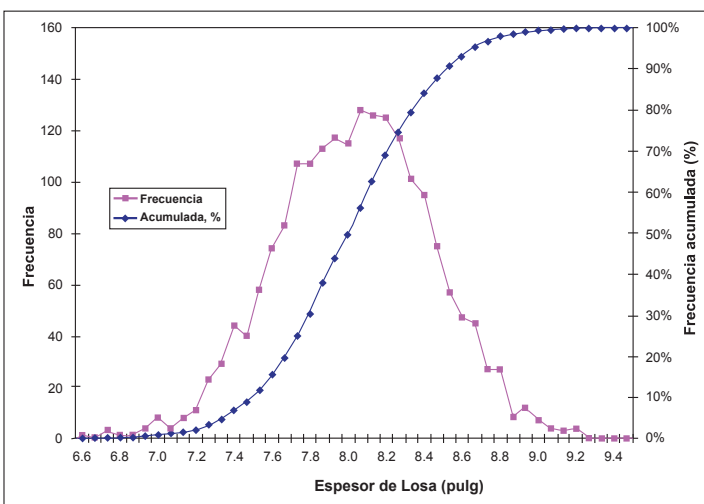


Figura 5. Distribución por frecuencia para la variable Espesor de Losa.

- Se espera que en promedio el esfuerzo en el acero sea de 61 213 psi (422.1 MPa) y la probabilidad de exceder el valor permitido promedio 61 828 psi (426.3 MPa) es de 40.7%.

La probabilidad de cumplimiento o de falla fue calculada utilizando distribuciones acumuladas para cada variable respuesta. Por ejemplo, se observa en la Figura 6 la distribución acumulada para el espaciamiento de grietas. Nótese como el 86.9% de los datos se encuentra dentro del rango requerido. Para un 40.7% de probabilidad de falla o excedencia en el acero indica que es más probable que se presenten deterioros asociados a la potencial baja capacidad soportante y transferencia de carga del acero; en este caso deformaciones o ahuellamientos en el pavimento.

El diseño original fue ligeramente modificado para mejorar con los requerimientos y se estableció un porcentaje de cumplimiento para todos los parámetros del 75%. Un incremento en el contenido

Tabla 5. Resultados del análisis

Parámetro	Espaciamiento de grietas, pies	Ancho de grietas, psi	Esfuerzo aplicado, psi	Esfuerzo permitido, psi
Promedio	3.988	0.035	61 213	61 828
Desviación Estándar	0.454	0.001	3622	321
COV	11.4%	0.2%	5.9%	0.5%
MAX	6.169	0.048	0.42	0.51
MIN	2.704	0.026	78 421	63 568
% Sobre valor límite	86.9%	NA	NA	NA
% Bajo valor límite	100%	100%	59.3%	NA

de acero produce una disminución en el esfuerzo que recibe el acero debido a la carga aplicada y por lo tanto disminuye la probabilidad de falla en el parámetro del esfuerzo aplicado en el acero. Sin embargo, a la vez se disminuye el cumplimiento del espaciamiento de grietas al producir grietas más cerca unas de otras. Por esto, no se puede obtener un 100% de cumplimiento para los 3 parámetros simultáneamente.

La Tabla 6 muestra los resultados del proceso iterativo llevado a cabo con la misma metodología de simulación modificando el espesor de la losa y el porcentaje de acero. Para obtener el cumplimiento de los 3 parámetros críticos de diseño fue necesario modificar levemente el espesor y el contenido de acero. Los resultados del análisis para 0.55% de acero y 8.0 pulgadas de espesor de la losa se observan en la Tabla 7.

De la Tabla 7 se encontraron los siguientes resultados:

- Se espera que el espaciamiento promedio sea de 3.84 pies (1.17 m) y la probabilidad de obtener espaciamientos de grietas dentro del rango establecido (3.5 a 8.0 pies) es de 77.1%.
- Se espera que en promedio las grietas sean de 0.033 pulg (0.84 mm) de ancho y la probabilidad de obtener anchos de grieta menores a 0.04 pulg es de 100%.
- Se espera que en promedio el esfuerzo en el acero sea de 59 636 psi (411.2 MPa) y la probabilidad de exceder el valor permitido promedio 61 820 psi (426.2 MPa) es de 24.6%.
- Con un pequeño cambio en el contenido de acero (de 0.535 a 0.55) se logró disminuir la probabilidad de exceder el esfuerzo máximo permitido en el acero (de 40.7% a 24.6%). A pesar de la disminución en la probabilidad de obtener espaciamientos de grietas dentro del rango establecido (de 86.9% a 77.1%), en general, se obtuvo una mejora en la confiabilidad del diseño.

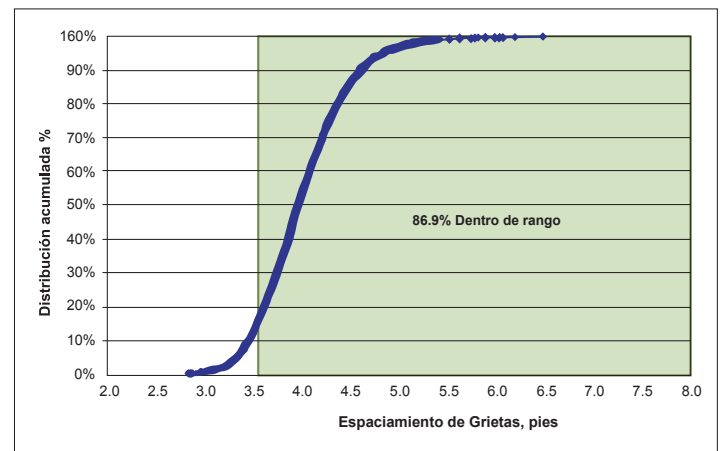


Figura 6. Frecuencia acumulada para ancho de grietas.

Tabla 6. Ajuste del diseño

Espesor (pulg)	% Acero	% Cumplimiento Esp. Grietas	% Cumplimiento Ancho Grietas	% Cumplimiento Esfuerzo Acero
8.0	0.60	27.7	100	97.6
8.5	0.60	46.8	100	92.9
8.5	0.55	90.1	100	51.8
8.0	0.55	77.1	100	75.4

Tabla 7. Resultados finales (0.55% acero y 8.0 pulgadas de espesor)

Parámetro	Espaciamiento de grietas, pies	Ancho de grietas, psi	Esfuerzo aplicado, psi	Esfuerzo permitido, psi
Promedio	3.839	0.033	59 636	61 820
Desviación Estándar	0.452	0.001	3 465	322
COV	11.8%	0.4%	5.8%	0.5%
MAX	6.283	0.047	0.42	0.45
MIN	2.771	0.026	76 138	63 270
% Sobre valor límite	77.1%	NA	NA	NA
% Bajo valor límite	100%	100%	75.4%	NA

CONCLUSIONES

Evaluación de la variabilidad de materiales y procesos constructivos en el diseño de pavimentos es una forma útil para entender el porqué a veces el producto final no se desempeña como se esperaba. No se trata simplemente de diseñar para cumplir con los requerimientos establecidos; se vuelve necesario incorporar la probabilidad de falla o cumplimiento de los parámetros críticos de diseño.

Para este caso específico, con la consideración de la variabilidad en variables de diseño se estimó que existe una alta probabilidad de exceder el valor permitido promedio de resistencia del acero (40.7%). Con el uso de la misma metodología usada para estimar esta probabilidad de excedencia se logró reducir significativamente este valor de incumplimiento.

En general, el diseño estocástico produce una mejora significativa ya que se reduce la probabilidad de incumplimiento de las especificaciones de diseño. Este aumento en la confiabilidad del diseño implica también el tener un mejor control sobre los deterioros esperados para este tipo de pavimento. En este caso se espera que los escalonamientos, desprendimientos del concreto y deformaciones plásticas sean los deterioros más probables que se presenten.

Finalmente, se recomienda analizar el diseño de este tipo de pavimento con metodologías que permitan la evaluación de la variabilidad. Además, en caso necesario se recomienda utilizar esta misma metodología de análisis para mejorar el diseño o disminuir la probabilidad de incumplimiento.

REFERENCIAS

1. Applied Research Associates, Inc., ERES Consultants Division (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of Pavement Structures, NCHRP Project 1-37A, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C.
2. Box G.E.P. & M.E. Müller. (1958) A Note on the Generation of Random Normal Deviates, The Annals of Mathematical Statistics, Vol. 29, No. 2 pp. 610-611.
3. Harr, Milton E., (1987): Reliability-Based Design in Civil Engineering: McGraw-Hill, Inc.
4. High Plains Regional Climate Center. (2006, 1 Febrero). <http://hprcc.unl.edu>.
5. Huang, Y.H. (2004) Pavement Analysis and Design. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
6. Laszlo Petho, ARRB Group Ltd., Australia (2012). Analysis Of The Stiffness Variability In Asphalt Layers Using The Monte Carlo Simulation. 25th ARRB Conference – Shaping the future: Linking policy, research and outcomes, Perth, Australia.
7. Lu Sun, W. Ronald Hudson, PE., and Zhanming Zhang (2003): Empirical-Mechanistic method based stochastic modelling of fatigue damage to predict flexible pavement cracking for transportation infrastructure management: Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, No. 2, March 1, 2003.
8. Samik Raychaudhuri, (2008): Introduction to Monte Carlo simulation: Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference Oracle Crystal Ball Global Business Unit 390 Interlocken Crescent, Suite 130 Broomfield, C.O. 80021, U.S.A.
9. Timm, D.H., Newcomb, D.E., Birgisson, B., and Galambos, T.V., (1999): Incorporation of Reliability into the Minnesota Mechanistic-Empirical Pavement Design Method: Final Report, MN/RC-1999-35, Minnesota Department of Transportation.