

# Desarrollo de un modelo de confiabilidad para el análisis del desempeño de puentes. Un caso de estudio en Costa Rica

Development of a reliability model for performance analysis of bridges. A case study in Costa Rica

Federico Picado Alvarado<sup>1</sup>, Giannina Ortiz-Quesada<sup>2</sup>

---

*Fecha de recepción: 2 de marzo de 2016*

*Fecha de aprobación: 23 de julio de 2016*

Picado-Alvarado, F; Ortiz-Quesada, G. Desarrollo de un modelo de confiabilidad para el análisis del desempeño de puentes. Un caso de estudio en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 30-1. Enero-Marzo 2017. Pág 79-89.

DOI: 10.18845/tm.v30i1.3087



1 Doctor en Ingeniería Industrial, Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: fpicado@itcr.ac.cr

2 Máster en Computación con énfasis en Sistemas de Información, Ingeniera en Construcción, Escuela de Ingeniería en Construcción, Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: gortiz@tec.ac.cr

## Palabras clave

Puente; evaluación de puentes; confiabilidad estructural; eBridge.

## Resumen

En el año 2013, como parte de los objetivos del proyecto de investigación eBridge del Tecnológico de Costa Rica, se realizaron varias pruebas de carga (no destructivas) en el puente que se ubica sobre el río Purires, en la entrada a San Isidro de El Guarco, Cartago, en la Ruta Nacional 1 o carretera Interamericana Sur. Para ello se utilizó una red inalámbrica de sensores (RIDS). Dicho proyecto pretende proponer un modelo de confiabilidad para evaluar el rendimiento estructural de puentes y de esta manera proveer parámetros específicos que ayuden a estimar su vida útil y saber en qué momento intervenirlos de manera preventiva.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos al realizar tres pruebas estáticas de carga, en las que se midieron variables críticas tales como como deformación, desplazamiento y deflexión. Se aplicaron técnicas estadísticas de bondad de ajuste para las deformaciones (*strains*) y, mediante pruebas de hipótesis, se determinó si los datos obtenidos en cada caso se ajustan adecuadamente o no a una distribución normal. Seguidamente, se utilizó la simulación Monte Carlo para obtener un índice de confiabilidad basado en la probabilidad de supervivencia y la probabilidad de falla para cada condición de carga estática.

Los resultados arrojaron datos importantes en cuanto a la probabilidad de falla ( $P_{\text{probabilidad}} = 0.047$ ) para un caso de carga estática, posteriormente al estudio realizado, en dicho puente se produjo una falla de impacto moderado en una de las vigas de soporte, constatando así la veracidad del estudio y la utilidad de las herramientas utilizadas.

## Keywords

Bridge; bridge evaluation; reliability; eBridge.

## Abstract

In 2013, as part of the e-bridge research project developed by the Institute of Technology of Costa Rica (TEC), a series of non-destructive loading tests were performed in a bridge located over the Purires River, San Isidro de El Guarco, Cartago using a Wireless Sensor Network (RIDS) to collect strain data. The research project intends, among other objectives, to develop a reliability model to assess the structural performance of bridges and providing key output variables to estimate reliability parameters such as failure probability, survival probability and reliability index. The latter information would be important to support a decision making system in terms of a bridge maintenance program.

In this paper, the results obtained using three static non-destructive loads over the Purires Bridge are discussed. Statistical techniques such as goodness of fit tests and Monte Carlo simulation were used to calculate critical structural and reliability indicators. Two of the static tests passed the international references in terms of reliability index; however, one of the statics loads (Case I) failed the analysis reporting a failure probability of 0.047 with a low reliability index of 1.667. It is worthwhile to mention that the same bridge suffered a moderate failure in a critical beam which would help to validate the methodologies and tools used in this project.

## Introducción

El proyecto *eBridge* nace a partir de un problema nacional (Costa Rica) en cuanto a renovación y mantenimiento de sus infraestructuras, que muchas veces se clasifican como estructuralmente deficientes, puesto que ya alcanzaron el límite de su vida útil de servicio y no son sometidas a ningún proceso de rehabilitación. Al respecto, los puentes de uso vial están entre los más afectados.

Es por esta razón que instituciones del Estado de Costa Rica entre ellas el Ministerio de Obras Públicas y Transportes y el Consejo Nacional vieron la oportunidad de colaborar en el mejoramiento de la infraestructura vial existente, mediante la propuesta de metodologías que permitan la predicción remota de fallas en los puentes. En este sentido, se consideró necesario crear un modelo de confiabilidad integrando variables aleatorias experimentales obtenidas mediante diferentes métodos de simulación.

Los actuales procedimientos analíticos avanzados permiten un análisis numérico exacto pero determinista de la relación tensión/esfuerzo de los componentes de un puente. Existen procedimientos matemáticos para el cálculo de la confiabilidad de los diversos sistemas idealizados: paralelo, serie y combinaciones, así como también hay novedades en cuanto a los materiales, la tecnología y las pruebas de campo que se pueden utilizar para mejorar el diseño del puente y su evaluación [1].

Es de especial interés mencionar que en el pasado se realizaron estudios sobre la detección de daños en las estructuras, la mayoría basados en parámetros dinámicos; además de los avances tecnológicos detectados en la creación de sensores y sistemas de adquisición de datos. En algunas evaluaciones estructurales en obras civiles, se ha comprobado que es posible utilizar el cambio de los parámetros dinámicos para determinar el daño en una estructura [2]. Pero no es sino hasta años recientes que en Costa Rica se está implementando la predicción de manera remota de estos daños o fallas, lo que la hace innovadora en su área; además de que mezcla varias disciplinas ingenieriles para la obtención y análisis confiable de la información.

Lo que se espera al final de este proyecto es un sistema experto que permita determinar la vida útil de los puentes a través de un modelo de confiabilidad estructural, para poder determinar cuándo es necesario su mantenimiento, rehabilitación o reemplazo antes de que colapsen o queden inhabilitados.

## Marco teórico

Los conceptos teóricos que fundamentan este trabajo se muestran a continuación. Es importante mencionar que un modelo de confiabilidad es una ecuación matemática que pretende determinar la probabilidad de ocurrencia de una falla [3]

El modelo de confiabilidad estará en función del estado límite, que se puede definir como [1]

$$G = R - S = 0 \text{ Margen de seguridad} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

R: Resistencia (capacidad momento)

S: Efecto de carga (momento aplicado)

De esta manera, si  $G > 0$ , se afirma que la estructura es segura, de lo contrario se considera que la estructura estaría en riesgo de falla. Con respecto a la probabilidad de falla, se tiene:

$$P_f = \text{Prob} (R - S < 0) = \text{Prob} (G < 0) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Los conceptos estadísticos de confiabilidad se desarrollan por medio de la determinación del Índice de Confiabilidad ( $\beta$ ), que se define como la inversa de la función estándar acumulada de la probabilidad de falla ( $P_f$ ) [4]):

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f) \quad (\text{Ecuación 3})$$

La distribución de la función límite (G) está determinada por la zona de falla donde la media de la función G ( $m_G$ ) es proporcional a la desviación estándar ( $S_G$ ). La proporción de estos dos parámetros es el índice de confiabilidad ( $\beta$ ) y, asumiendo una distribución normal, esta puede evaluarse como:

$$m_G = \beta * S_G \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\beta = \frac{m_G}{S_G} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{s_R^2 + s_S^2}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde:

$m_R$ ,  $m_S$ : medias de la distribución de la resistencia y las cargas

$S_R$ ,  $S_S$ : desviaciones estándar de la distribución de la resistencia y las cargas.

Los índices de confiabilidad de tres códigos internacionales para el análisis de confiabilidad estructural en puentes, según [5]son los siguientes:

1. Código Europeo:  $\beta = 7.0 - 8.0$
2. Código Español:  $\beta = 5.1 - 6.8$
3. Código AASHTO:  $\beta = 4.5 - 4.9$

En cuanto a las aplicaciones, ventajas y desventajas del uso de la simulación Monte Carlo como una herramienta útil para modelar fenómenos con cierto grado de incertidumbre, las más importantes son confiabilidad, disponibilidad, logística, pronósticos, análisis del riesgo y análisis de interferencias carga-resistencia, lo que es altamente relacionable con el objetivo de la investigación. Se trata de un método iterativo de simulación para evaluar un modelo determinístico utilizando variables y números aleatorios. Se fundamenta en conocer *a priori* las distribuciones de probabilidad de las variables bajo estudio. Los datos generados por una simulación pueden ser representados y analizados mediante técnicas estadísticas tradicionales [2]

Ebeling [6]describe y aplica los pasos a seguir para la adecuada selección de una distribución de probabilidad teórica para una variable aleatoria continua o discreta, mediante pruebas de bondad de ajuste. Las pruebas recomendadas son Anderson Darling, Kolmogorov-Smirnov y Ryan-Joiner. Los valores típicos del nivel de significancia utilizado son  $\alpha = 0.05$  y  $0.10$ .

Por último, cabe mencionar que una prueba de carga es la medición de la respuesta de una estructura de un puente sujeto a cargas conocidas y controladas sin que se causen cambios en la respuesta elástica de esta [7].

## Desarrollo

En esta investigación se efectuaron tres pruebas de carga, con los siguientes objetivos principales [8]: Determinar las deformaciones, desplazamientos en juntas, desplazamientos verticales en vigas y aceleraciones asociadas a las cargas dadas.

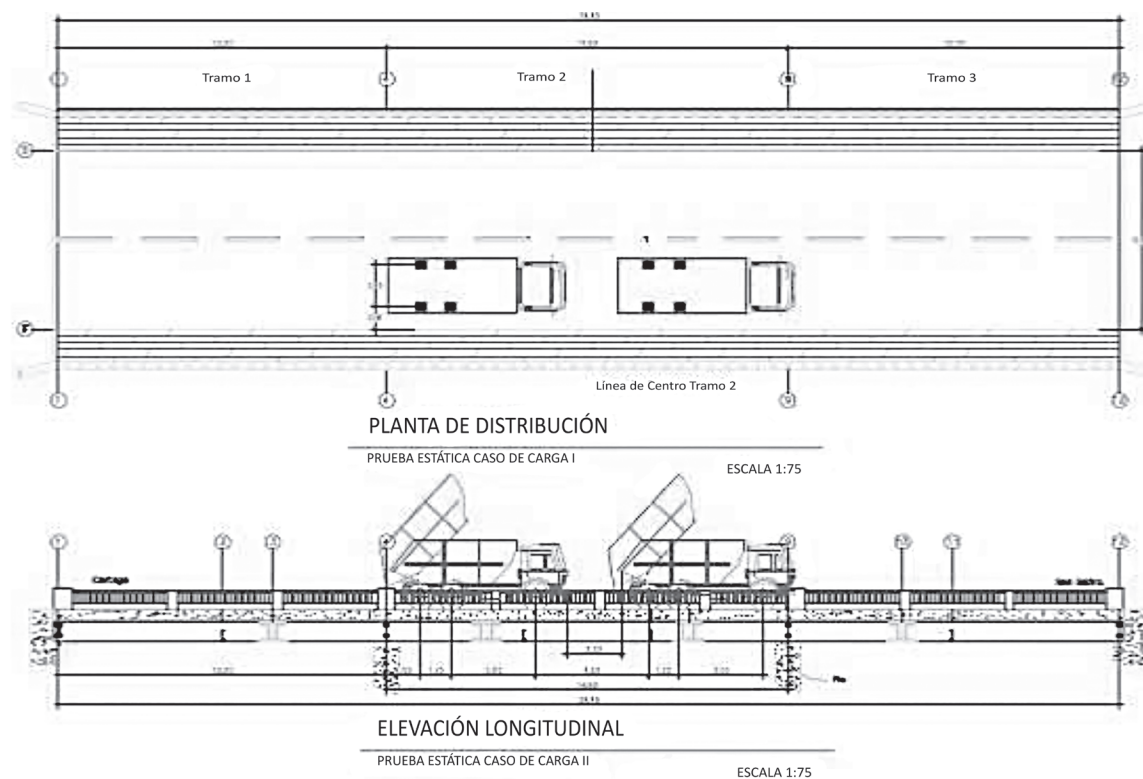
1. Establecer la capacidad del puente con los datos obtenidos.
2. Revisar las condiciones estructurales y de servicio del puente.

El tipo de prueba realizada, así como su caso de carga, se detalla en el cuadro 1.

**Cuadro 1.** Tipos de pruebas realizadas en Purires

Tipo de prueba	Variable a medir	Caso de carga	Duración de la prueba
Estática	Deformación	Caso I y Caso II	30 minutos
	Desplazamiento		
	Deflexión		

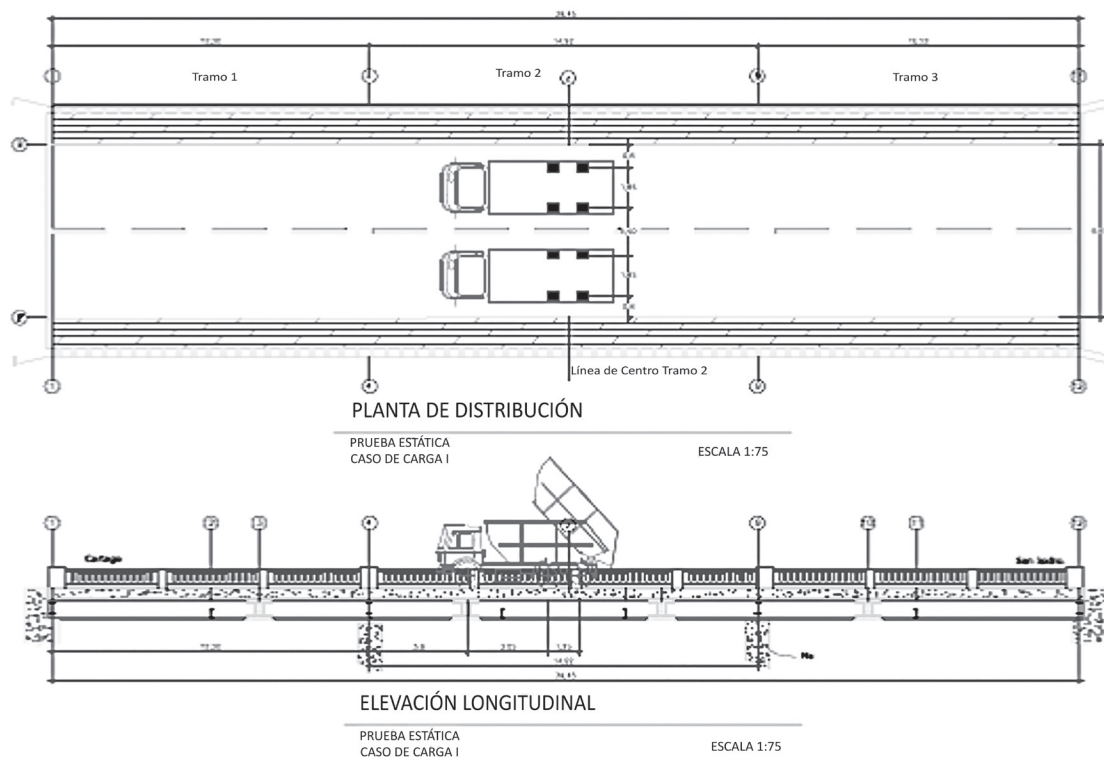
En las figuras 1 y 2 se ejemplifican el Caso I y el Caso II, respectivamente:



**Figura 1.** Prueba estática del Caso de carga I

**Puente seleccionado: Río Purires, El Guarco, Cartago**

El puente llamado “Purires” se ubica en la ruta nacional número 2. Es un puente de vigas continuas de acero W27X94, de 39,45 m de longitud total y una distancia promedio entre apoyos menor a 15 m. Cuenta con cuatro puntos de apoyo. Posee una losa de concreto de 15 cm de espesor con refuerzo de acero #6 cada 15 cm de forma transversal y cada 25 cm longitudinalmente y una sobrecapa de asfalto que varía entre 14 y 7 cm de espesor.

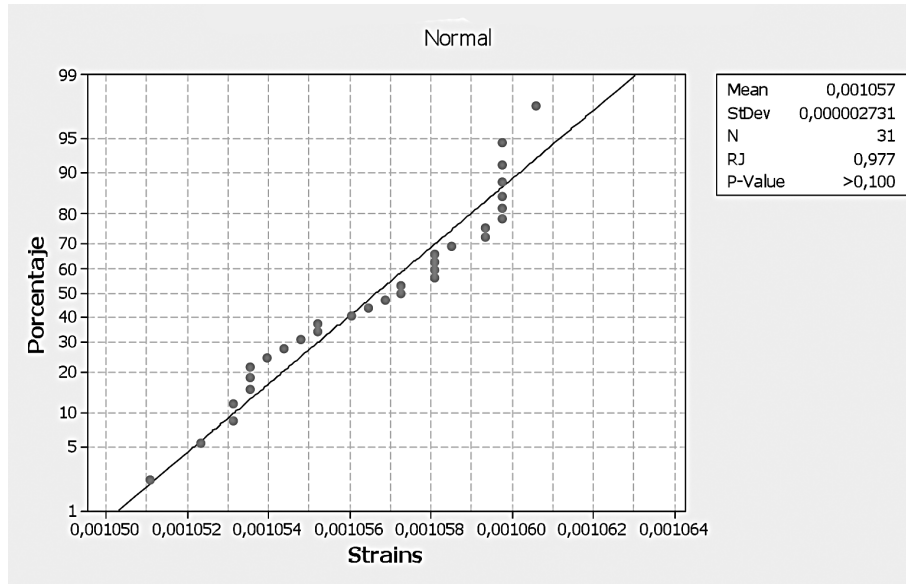


**Figura 2.** Prueba estática del Caso de carga II

El puente cuenta con dos carriles y doble vía y el promedio diario de vehículos que transitan por él es de 11,318 (conteo vehicular proporcionado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, MOPT), el ancho de la superficie de ruedo es de 6,6 m y dispone de aceras de 1,5 m. La distancia libre desde el río tiene un promedio de 5 m. Se estima que este puente se construyó en los años 50, aunque se desconoce la fecha exacta [9].

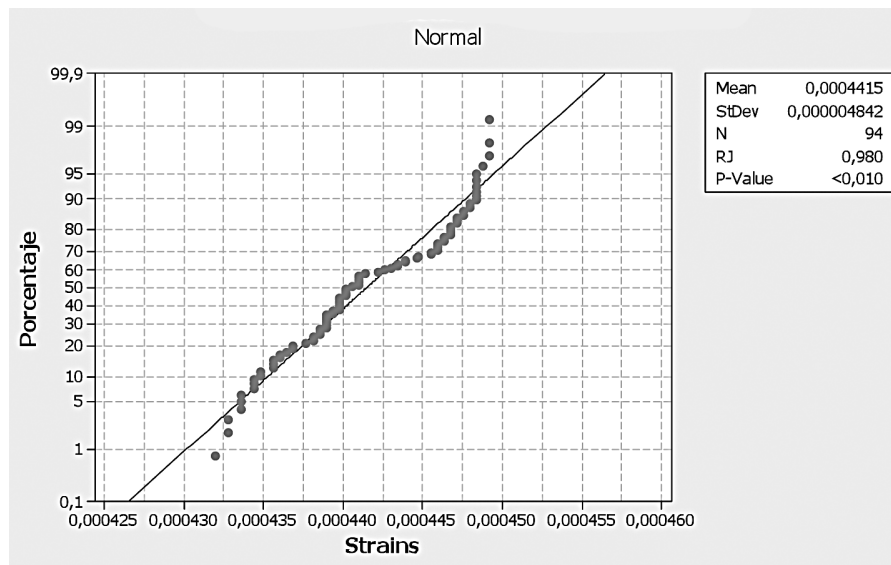
- Propiedades del material
  - Acero A33. W 27x94
  - Módulo de elasticidad = 2,038,901,78 kg/cm<sup>2</sup>
  - Esfuerzo de fluencia kg/cm<sup>2</sup>: Promedio: 2574.78, desviación estándar: 295.72.[3].
- Pruebas estáticas
  - Tomado de protocolo presentado por Carvajal [10].
  - Prueba estática: Caso I.
  - Prueba estática: Caso II
  - Prueba estática: Caso IIa
- Análisis estructural realizado con el programa SAP2000
- Pruebas de bondad de ajuste para los valores de deformaciones (*strains*)
- Las pruebas de hipótesis a probar es la siguiente:
  - H<sub>0</sub>: datos siguen una distribución normal
  - H<sub>1</sub>: datos no siguen una distribución normal
- Para la prueba de hipótesis se utilizará un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ .

- Caso I: Valor  $P(0.10) > \alpha$ . No hay suficiente evidencia estadística para concluir  $H_1$ . Los datos siguen una distribución normal (figura 3).



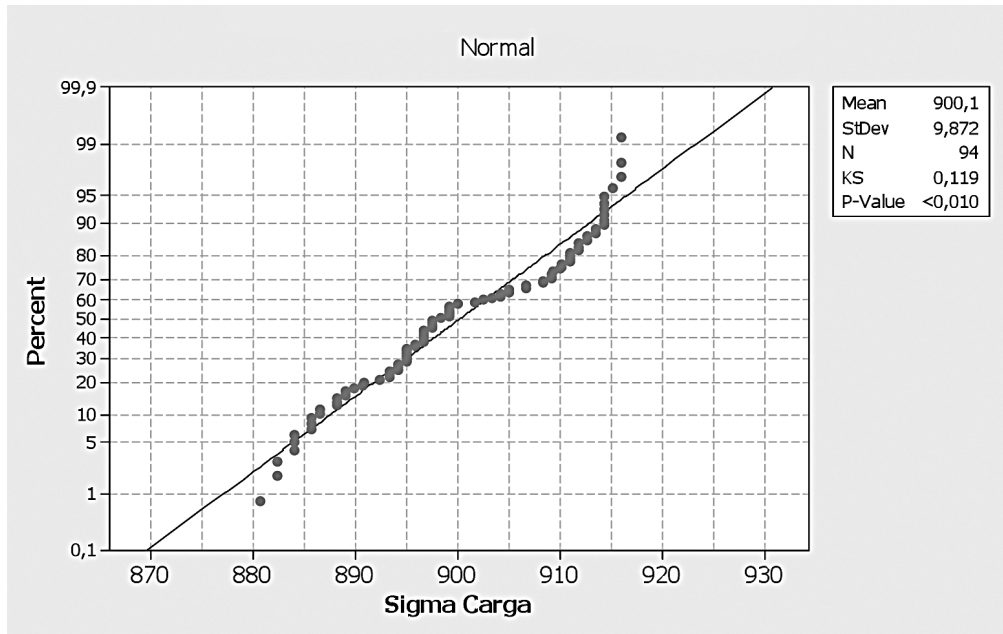
**Figura 3.** Gráfico de probabilidad Caso I

- Caso II: Valor  $P(0.010) < \alpha$ . Hay suficiente evidencia estadística para concluir  $H_1$ . Los datos no siguen una distribución normal (figura 4).



**Figura 4.** Gráfico de probabilidad Caso II

- Caso III: Valor  $P(0.010) < \alpha$ . Hay suficiente evidencia estadística para concluir  $H_1$ . Los datos no siguen una distribución normal (figura 5).



**Figura 5.** Gráfico de probabilidad Caso IIa.

- Los resultados del escenario de simulación I se muestran en el cuadro 2.

**Cuadro 2.** Resultados de escenario de simulación I

	Datos de pruebas	Índice de confiabilidad	Probabilidad de supervivencia	Probabilidad de falla
Tipo de prueba	n	$\beta$	R	$P_f$
Prueba estática I	31	1,667	0,952281186	0,047718814
Prueba estática II	94	5,239	0,9999999	8,05317E-08
Prueba estática IIa	94	6,105	9,99999995E-01	5,1149640E-10

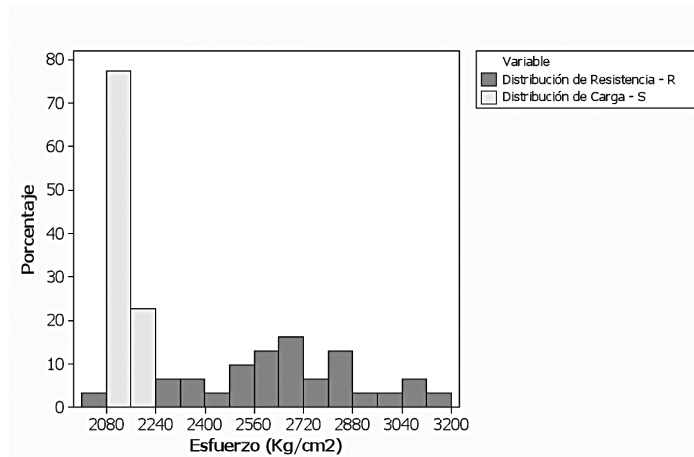
- Para realizar el escenario de simulación II es necesario calcular el número de réplicas, con base en la fórmula propuesta por Estes[3]:

$$n = \frac{10}{P_f}$$

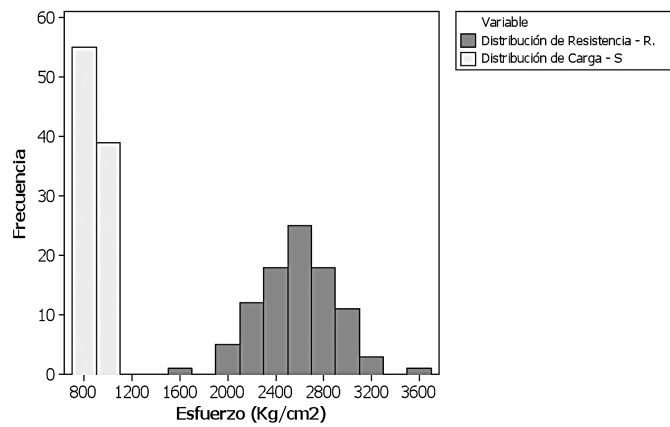
donde  $P_f$  es tomado del escenario de simulación I.

- Los resultados del escenario de simulación II se muestran en el cuadro 3.

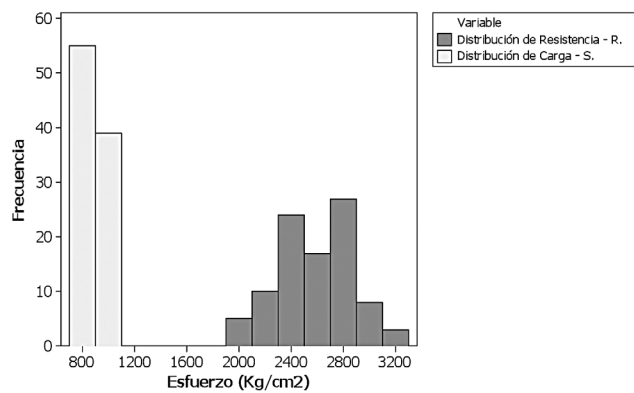




**Figura 6.** Distribución de esfuerzo versus resistencia. Caso I



**Figura 7.** Distribución de carga versus resistencia. Caso II



**Figura 8.** Distribución de carga versus resistencia. Caso IIa

**Cuadro 3.** Resultados de escenario de simulación

	Cantidad de datos simulación	Índice de confiabilidad	Probabilidad de supervivencia	Probabilidad de falla
Tipo de prueba	n	$\beta$	R	$P_f$
Prueba estática I	210	1,320	0,906615764	0,093384236
Prueba estática II	1000	5,619	0,99999999	0,00000001
Prueba estática Ila	1000	5,538	9,99999985E-01	1,5286251E-08

(\*) Cuando n es muy grande, se utilizan 1000 réplicas.

- En relación con la prueba estática de carga I (cuadro 2) con un índice de confiabilidad  $\beta = 1.6677$ , no se cumple con los requerimientos de ningún código internacional para el análisis estructural de puentes. La figura 6 representa el comportamiento de los valores de carga y resistencia. Se recomienda revisar el protocolo de carga utilizado en esta prueba y el análisis estructural realizado para analizar con mayor detalle las causas y efectos de un índice de confiabilidad bajo.
- Los índices de confiabilidad para las pruebas estáticas de carga II y Ila (cuadro 2) cumplen satisfactoriamente los requerimientos de los códigos Español y AASHTO; sin embargo, no satisface los requerimientos del código Europeo. Las figuras 7 y 8 representan el comportamiento de los valores de carga y resistencia en ambos escenarios.
- Sobre los resultados del escenario de simulación II (cuadro 3), se mantienen las mismas conclusiones anteriores, donde la prueba estática I no satisface los requerimientos de los códigos internacionales, mientras las pruebas estáticas II y Ila sí cumplen satisfactoriamente los requerimientos internacionales.
- Es importante analizar con más detalle el comportamiento no normal de algunos datos de deformaciones (*strains*) en dos pruebas de carga estática, ya que el análisis posterior para el cálculo del índice de confiabilidad asume una distribución normal.
- Se sabe actualmente que el puente sobre el río Purires presentó una falla de magnitudes importantes en cuanto a deformaciones (Caso I). Esto indica que si se hubieran realizado las pruebas a tiempo, se hubiera podido intervenir el puente y atender a tiempo la falla, todo esto si se toma en consideración que el valor de probabilidad de falla es de  $P_f = 0.047$ , lo cual es muy alto ya que es de casi un 5%, si se compara este valor con un  $\alpha = 0.05$ , que equivale a un 95% de nivel de confianza.

## Conclusiones y recomendaciones

- El análisis de confiabilidad estructural basado en índices de confiabilidad para el puente del río Purires cumple satisfactoriamente los requerimientos de dos códigos internacionales para dos pruebas estáticas. Solamente para una condición de carga no los satisface.
- Se debe analizar con más detalle el comportamiento no normal de algunos datos de deformaciones (*strains*).
- Los protocolos de pruebas de carga y análisis estructural son satisfactorios para el análisis posterior del cálculo de índices de confiabilidad, probabilidad de fallas y probabilidad de confiabilidad y para el diseño de un modelo de confiabilidad.
- El uso de la simulación Monte Carlo demostró ser una herramienta muy valiosa para el desarrollo de un modelo de confiabilidad.

- La metodología empleada cumplió satisfactoriamente las necesidades del análisis requerido.
- Se mejoró el modelo de confiabilidad propuesto en la primera fase de eBridge, al integrar otras variables aleatorias experimentales y otras variables obtenidas con la aplicación de la simulación Monte Carlo.

Se hacen las siguientes recomendaciones:

- Analizar el comportamiento no normal de algunas variables.
- Determinar una metodología para el manejo de variables continuas no normales.
- Aplicar la metodología empleada en otros puentes que tengan los datos de pruebas estáticas y análisis estructural ya obtenidos.
- Continuar depurando la metodología utilizada en el puente piloto.

## Bibliografía

- [1] Nowak, A.S. (2004). System Reliability Models for Bridge Structures. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 52(4).
- [2] O'Connor, P. & Kleyner, A. (2012). *Practical Reliability Engineering*. 5 ed. EE.UU.: Wiley.
- [3] Estes, A.C. (1997). *A System Reliability Approach to the Lifetime Optimization of Inspection and Repair of Highway Bridges*. PhD Thesis. University of Colorado.
- [4] Muñoz, E. et al. (agosto, 2006). Confiabilidad estructural apoyada en monitoreo e instrumentación: aplicación en un puente de acero. *Revista Ingeniería en Construcción*, 21(2).
- [5] Nowak, A.S. et al. (2000). *Reliability Analysis of Prestressed Concrete Bridge Girders: Comparison of Eurocode, Spanish Norma IAP and AASHTO LRFD*. 8<sup>th</sup> Annual ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability.
- [6] Ebeling, C.E. (2010). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. 2 ed. EE.UU.: Waveland Press, Inc.
- [7] AASHTO. (2011). *Manual for Evaluation of Bridges*.
- [8] Ortiz Quesada, G. et al. (2013). *Documento I. Informe técnico de los resultados del Proyecto eBridge: Predicción remota de fallas en puentes*. VIE-TEC.
- [9] Carvajal, J. (2012). *Pruebas Carga. Proyecto de investigación eBridge. Protocolo. Puente sobre el Río Purires*. Cartago, C.R.: Tecnológico de Cartago.
- [10] Estes, A.C. et al. (july, 1999). Repair Optimization of Highway Bridges Using System Reliability Approach. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 125, No.7, pp 766-775.
- [11] Frangopol, D.M. et al. (january, 2001). Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 15, No.1, pp. 1-32.
- [12] Nowak, A.S. et al. (1990). System Reliability Models for Bridges. *Structural Safety*, 7, 247-254.