

TECNICAS DE EVALUACION DE PUENTES MEDIANTE CRITERIOS DE CONFIABILIDAD PARCIAL. APLICACION A UN PUENTE DE CONCRETO PREENFORZADO

BRIDGE EVALUATION TECHNIQUES BY PARTIAL RELIABILITY CRITERIA. CASE STUDY: A PRESTRESSED CONCRETE BRIDGE

Por / By Edgar Muñoz, Jorge Alonso Prieto, Nelson Obregón

Resumen

Los análisis de seguridad estructural en términos de confiabilidad, proveen un vínculo directo con una evaluación de riesgo y decisión económica. El término "confiabilidad parcial" incluye condiciones actuales del estado de la obra (degradación, deficiencia, falla, etc.) y las cargas actuales del tráfico, pero no considera efectos por sismos, vientos, inundaciones o socavación. El modelo que se ha desarrollado es una combinación de análisis estructural basado en elementos finitos discretos y técnicas de simulación numérica de Montecarlo, mediante programas desarrollados en Matlab® (The MathWorks, 2002). De acuerdo con este modelo híbrido es posible proyectar al futuro la seguridad del puente, proporcionándose así un método preventivo con ventajas sobre el tradicional método determinístico, el cual se basa en las especificaciones del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP). Se presenta una descripción de la metodología y los resultados de la evaluación de capacidad de carga del puente Río Negro ubicado en la carretera Honda – Río Ermitaño.

Palabras clave: Confiabilidad, puentes, riesgo, capacidad de carga, probabilidad, elementos finitos y método de Montecarlo

Abstract

Structural safety analyses based on reliability provide a direct link with risk evaluation and economic decision. The term "partial reliability" allows for actual conditions of the state of a civil work, e.g. degradation, deficiency, failure, etc. and actual traffic loads, but it does not include earthquake, wind, flood or scour effects. The model developed in this paper is a combination of structural analysis based on discrete finite elements and Montecarlo simulation techniques using Matlab® software. The use of the model allows the safety of a bridge to be projected into the future providing a preventive method with advantages over the traditional deterministic procedure, based on the Colombian Code for earthquake design of Bridges. A description of the methodology and results of the load capacity evaluation for the Río Negro bridge, located in the Honda-Río Ermitaño road, are presented.

Keywords: Reliability, bridges, risk, load capacity, probability, finite elements, Montecarlo simulation

1. INTRODUCCION

No existe en Colombia especificaciones mediante técnicas de confiabilidad para la evaluación estructural de los puentes existentes; herramienta que se considera esencial y necesaria para tomar decisiones técnicas y análisis económico en el proceso de rehabilitación y conservación de las obras de infraestructura vial (Puentes). Se han realizado los estudios por confiabilidad estructural de los puentes (Daza et al., 2002) Luis Ignacio Andrade (Pedelta, 1999), Puerto Salgar y el del Río Negro. En cada uno de ellos se han obtenido resultados importantes, lo cual justifica el empleo de la confiabilidad, con la cual se pueden dar recomendaciones seguras y óptimas sobre el mantenimiento y refuerzo de los puentes.

2. METODOLOGIA

En la Figura 1 se presenta un diagrama de flujo que describe la metodología que se desarrolló, posteriormente se hace una descripción de cada una de las etapas con sus respectivos avances.

2.1 Recopilación de Información Existente

Los documentos necesarios para la evaluación de capacidad de carga son:

- Planos de diseño, construcción y rehabilitación.
- Memorias de cálculo de la superestructura.
- Informes del inventario y levantamiento.
- Inspección visual y evaluación cualitativa del estado de cada uno de los componentes del puente.
- Inspección especial mediante ensayos con equipos de patología.
- Resultados de los ensayos destructivos y no destructivos. (resistencia del concreto, resistencia del acero, carbonatación, etc.).
- Informes de la interventoría en construcción o rehabilitación.

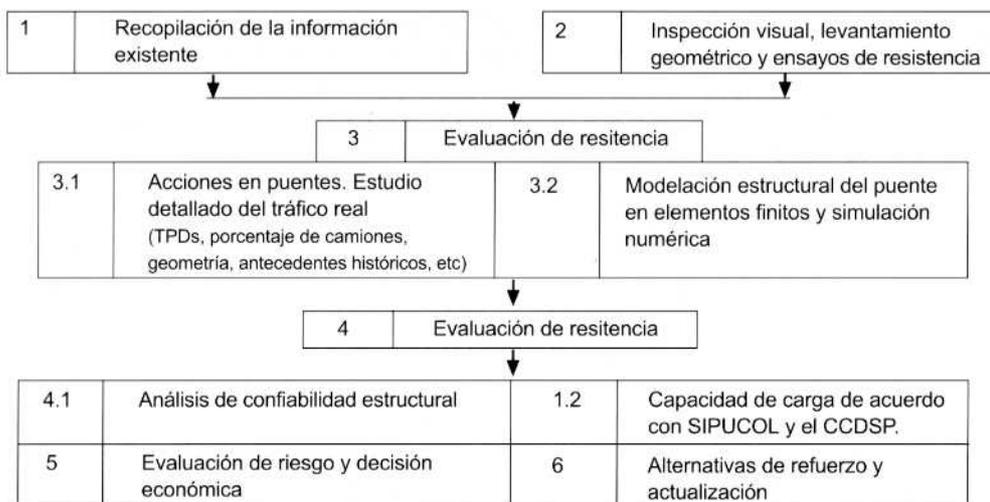


Figura 1. Diagrama de flujo de las etapas de la metodología

2.2 Inspección Visual, Ensayos y Levantamiento Geométrico

Consistió en labores de campo en el sitio del puente, las cuales dependen básicamente de la información disponible. Se utilizaron equipos de inspección y de patología. Incluyó los siguientes aspectos:

- Inspección visual mediante la utilización de andamios, cinturones de seguridad y en algunos casos canastas de inspección para puentes con estructuración difícil para el acceso.
- Elaboración de una geometría detallada y levantamiento de la superestructura.
- Ensayos destructivos (extracción y ensayos de compresión de núcleos) y no destructivos (ultrasonido, esclerómetro y otros) de la resistencia del concreto.
- Ensayos de patología (carbonatación o bajo de pH, cloruros, etc.)
- Verificación y detección de los refuerzos de flexión y cortante existentes, utilizando equipos de ultrasonido y remoción parcial del concreto (apiques).
- Registro fotográfico detallado.

2.3 Evaluación de las Cargas de Tráfico

Para la evaluación de la capacidad de carga de los puentes por confiabilidad es fundamental el estudio detallado del tráfico sobre éstos, el cual depende de diversos factores, i.e.:

- La composición del tráfico, donde se incluye el estudio de:
 - Intensidad y densidad del tráfico.
 - Porcentaje de vehículos pesados.
 - Tipos de vehículos.
 - Tránsito promedio diario (TPD_s)
- Las características geométricas y las cargas actuales por ejes de los vehículos pesados.
- Distancias longitudinales entre los ejes y transversal entre las ruedas de los vehículos.
- Las características del puente, su tipología estructural, esquema estático, etc.

- Evaluación del impacto, que depende de la interacción entre vehículo – estructura y produce un efecto dinámico sobre la estructura. Depende adicionalmente del estado del pavimento, de las juntas de dilatación y del tipo de amortiguamiento del vehículo.

En el programa que se desarrolló, se hace simulación numérica de las cargas reales basados en los aspectos anteriores, especialmente en la composición y el tipo de tráfico (camiones reales). En diferentes artículos y en estudios recopilados (Sobrino, 1998) se recomiendan tres (3) situaciones supuestas para analizar las sollicitaciones del tráfico real sobre los puentes tales como: Tráfico en situación de atasco, saturado, paso de un único vehículo pesado. Para las combinaciones de carga, se emplea el método de Montecarlo, mediante la generación de variables aleatorias uniformemente distribuidas, con el objeto de identificar las posibles combinaciones de los camiones y su aplicación (presencia) en el modelo estructural. Todo con base en el análisis de la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los camiones (estudio del tráfico) y el porcentaje de camiones pesados obtenido con base en el TPD_s.

2.4 Modelación Estructural de los Puentes

El programa que se desarrolló para la evaluación de puentes utiliza el método de los elementos finitos discretos que modela estructuras tipo parrilla o entramado. La aplicación utiliza elementos tipo barra para las vigas principales, riostras, bordillo y la losa. Se desarrolló como una herramienta abierta para que en el futuro se analicen puentes de acero de armaduras (paso a través, superior e inferior), colgantes y en arco. Se implementó la simulación numérica de las cargas reales sobre el modelo, que consistió en la evaluación de combinaciones de carga, basadas en la probabilidad de existencia de los diversos tipos de vehículos pesados en el puente, con su respectiva geometría y peso de los ejes. Mediante siete (7) variables básicas (luces número de vigas, número de riostras, variable de discretización, distancia transversal entre ejes de vigas, distancia al voladizo y esviajamiento) el programa genera la geometría en planta del modelo estructural, calculando los siguientes aspectos básicos necesarios para la solución:

- Identificación y propiedades geométricas de los tipos de elementos (viga principal, diafragma central, diafragmas en los apoyos y el elemento losa).
- Numeración de los nudos y de los elementos.
- Incidencias de los elementos de acuerdo con la numeración de los nudos y elementos.
- Identificación del tipo y cantidad de elementos (vigas, riostras, losa)

En el programa la variable de discretización de la losa, se encarga de crear el número de elementos de la losa en el sentido transversal, lo cual establece las características y calidad de la malla de los elementos vigas que se van a conformar. Entre más elementos losa es mayor la precisión del modelo parrilla. Además, se analizan las solicitaciones producidas por el camión de diseño (C40-95) utilizado para las carreteras de Colombia (Véase apéndice), determinando los efectos máximos tanto a cortante y a flexión en las vigas principales, con el objeto de compararlos con las cargas reales.

2.5 Evaluación de la Resistencia

Para el estudio de las curvas de resistencia es necesario un levantamiento geométrico detallado de la superestructura de los puentes y los ensayos tanto destructivos y no destructivos de los materiales principales de la estructura. En este trabajo se utilizó y adaptó una hoja electrónica con programación en Visual Basic, con la cual en el año 1998 se revisó la capacidad de carga de cuatrocientos (400) puentes de viga y losa (Muñoz, et al., 1998). Dicho programa se complementó para la evaluación de las curvas de distribución de resistencia, incluyendo los resultados del laboratorio y de las solicitaciones producidas por el programa en MATLAB (The MathWorks, 2002).

2.6 Análisis de Confiabilidad Estructural

Los valores nominales de factores de seguridad y demás coeficientes estipulados en los códigos son calculados, en su mayoría, mediante técnicas de confiabilidad estructural y su objetivo es mantener la estructura en un rango de funcionamiento alejado de la falla o con una probabilidad de falla tendiente a cero. Dado que las probabilidades de falla son muy pequeñas (del orden de 10^{-5}) y para facilitar el análisis de los valores hallados, en los códigos se maneja el índice de confiabilidad (β), definido como la inversa de la función normal estándar acumulativa de la probabilidad de falla (P_f):

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

La proporcionalidad inversa que existe entre β y P_f representada en la ecuación anterior, donde menor probabilidad de falla relacionada con el índice de confiabilidad indican una buena seguridad de la estructura. Para tal efecto se utilizarán las técnicas de confiabilidad, las cuales consisten en verificar la probabilidad entre las curvas de la resistencia (R) y de la solicitación (S). Cuando la función G ($G = R - S$) es negativa, la estructura se encuentra en condición de falla, cuando es mayor que cero la seguridad de la estructura es aceptable y cuando es igual a cero la estructura se encuentra en condición crítica. Al

término G se le conoce como margen de seguridad. Debido a la gran cantidad de variables que intervienen tanto en el cálculo de la resistencia como en el cálculo de la solicitación, estas son tomadas como variables aleatorias con su correspondiente distribución de probabilidad (véase Figura 2). Para el caso de las variables aleatorias distribuidas R y S, diversos estudios muestran que las funciones de densidad son normales (Sobrinó et al., 1993). El margen de seguridad se puede expresar como:

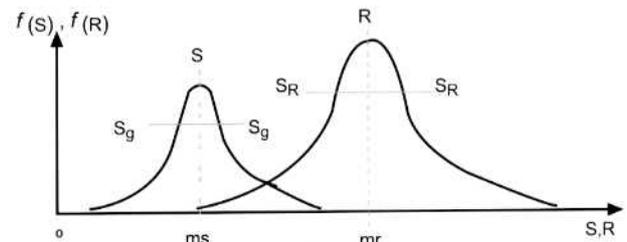


Figura 2. Curva de confiabilidad

Donde m_R , m_S y m_G corresponde a las medias de la distribución de la resistencia, solicitaciones y estado límite respectivamente. Además s_R , s_S y s_G son las desviaciones estándar de la distribución de la resistencia, solicitación y la función límite respectivamente. En la zona enmarcada en un círculo se presenta la probabilidad de falla, cuando la solicitación supera a la resistencia. La distribución de la función límite G está determinada por esta zona de falla en 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 (β), por consiguiente esta asume una distribución normal que puede evaluarse como:

$$m_G = \beta \cdot s_G \quad (2)$$

$$\beta = \frac{m_G}{s_G} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{s_R^2 + s_S^2}} \quad (3)$$

El rango admisible de probabilidad de falla especificada en el EUROCODE (European Committee for Standardization, 1993), se basa en el documento No. 1 Volumen 3 denominado: "Traffic loads on bridges" (Taner et al., 1998). Las recientes normativas europeas se han calibrado para una máxima probabilidad de fallo entre $P_f = 10^{-4}$ y $P_f = 10^{-6}$, lo que equivale a un rango de los índices de confiabilidad (β) admisibles entre 3.5 y 4.5.

El método de Montecarlo abarca una colección de técnicas que permiten obtener soluciones de problemas matemáticos o físicos por medio de pruebas aleatorias repetitivas. El proceso modela observaciones, y los resultados son tabulados y tratados como si fueran datos experimentales representativos del problema actual. La clave de la simulación está en generar una serie de valores de uno o más variables aleatorias con densidad de probabilidad especificada, examinando la manera como se comporta el sistema, relacionando con los valores aleatorios, y tabulándolos como si estos fuesen resultados de un proceso experimental. El objetivo de la metodología es mostrar un procedimiento claro para la determinación de los parámetros que se necesitan para verificar la seguridad estructural por medio del índice de confiabilidad.

3. RESULTADOS

Las cargas debidas al tráfico en carreteras se deben estudiar mediante campañas de información, tales como conteos (estáticos o en movimiento) y pesajes. Dicha información es suministrada por la entidad estatal, donde se viene estudiando los pesajes de las carreteras más importantes del País desde el año de 1995 hasta la fecha (véase Figura 3). En Colombia, el gremio de transportadores no ha sido consciente ni responsable del daño que producen las sobrecargas sobre las estructuras de los puentes y los pavimentos. Por esta razón, la entidad tiene en funcionamiento estaciones de control de peso fijas y estaciones móviles localizadas en las principales carreteras de la Red Vial Nacional, con el objeto de controlar y sancionar los camiones sobrecargados. En la Figura 3 se presentan los resultados estadísticos del sobrepeso de los camiones que transitan por la Red Vial Nacional. Se observa una sobrecarga importante en las carreteras, que varía aproximadamente entre un 10% y un 15% (véase Figura 3), lo que viene afectando el estado, la durabilidad y la capacidad de carga de los puentes.

Sobrepeso en la Red Vial Nacional - Porcentaje de peso bruto con sobrepeso

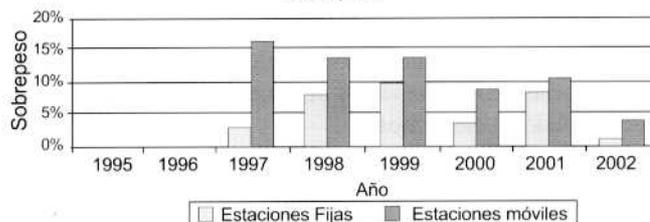


Figura 3. Gráficas de la variación de los sobrepesos en Colombia (Fuente -Instituto Nacional de Vías)

A continuación se presentan los resultados de la revisión estructural del puente Río Negro localizado en la carretera Honda - Río Ermitaño, el cual en el año de 1998 se reforzó mediante tensionamiento exterior en las vigas principales de la superestructura.

<p>DESCRIPCIÓN DEL PUENTE</p>	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>Río Negro</td> </tr> <tr> <td>Carretera</td> <td>Honda - Río Ermitaño</td> </tr> <tr> <td>Longitud</td> <td>Cuatro luces de 30 metros, para 120 metros de longitud total</td> </tr> <tr> <td>Ancho</td> <td>8.2 metros</td> </tr> <tr> <td>Descripción</td> <td>Puente simplemente apoyado de concreto preesforzado y losa en concreto reforzado.</td> </tr> </table>	Nombre	Río Negro	Carretera	Honda - Río Ermitaño	Longitud	Cuatro luces de 30 metros, para 120 metros de longitud total	Ancho	8.2 metros	Descripción	Puente simplemente apoyado de concreto preesforzado y losa en concreto reforzado.	
Nombre	Río Negro											
Carretera	Honda - Río Ermitaño											
Longitud	Cuatro luces de 30 metros, para 120 metros de longitud total											
Ancho	8.2 metros											
Descripción	Puente simplemente apoyado de concreto preesforzado y losa en concreto reforzado.											
<p>RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE E INSPECCION VISUAL</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio de capacidad de carga. Informe de interventoría para el mantenimiento y la rehabilitación del puente Río Negro. • Memorias de cálculo originales de 1970. • Planos de refuerzo y actualización de estudio. Informe de SIKA, sobre las especificaciones de los materiales del puente y el levantamiento geométrico (incluyendo refuerzo). Datos sobre el tráfico, suministrada por la entidad. Informe de interventoría y anexo fotográfico. • Cartilla volumen del tránsito del año 2000. Informes de inventario e inspección principal del puente. 											
<p>EVALUACIÓN DE SOLICITACIONES. Acciones en puentes y estudio detallado del tráfico.</p> <p>TPDs (Tránsito Promedio Diario) CAMIONES 60% BUSES 30% AUTOS 10%</p>												

Figura 4. Simulación del tráfico en el programa MATLAB(The MathWorks, 2002)

MODELACIÓN ESTRUCTURAL DEL PUENTE

En estudios similares la forma de la curva de densidad de probabilidad, en la evaluación de solicitaciones sobre puentes generalmente es normal. Es necesario en cada caso, establecer el número adecuado de combinaciones de carga, para determinar la forma de densidad de probabilidad. En este ejercicio, se realizaron solamente 1000 combinaciones y se consideraron distribuciones normales, sin embargo se debe complementar la metodología mediante optimización del algoritmo desarrollado.

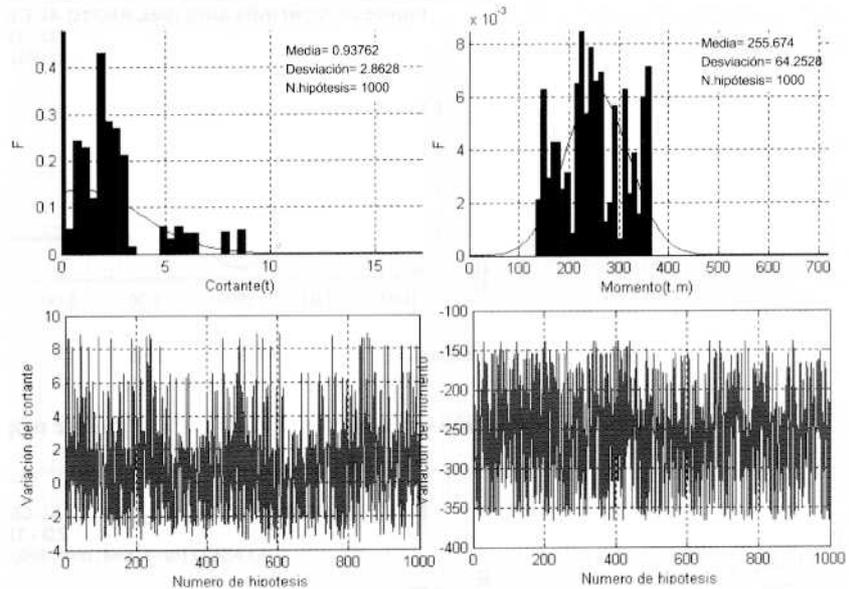


Figura 5. Caso de atasco, 1000 hipótesis

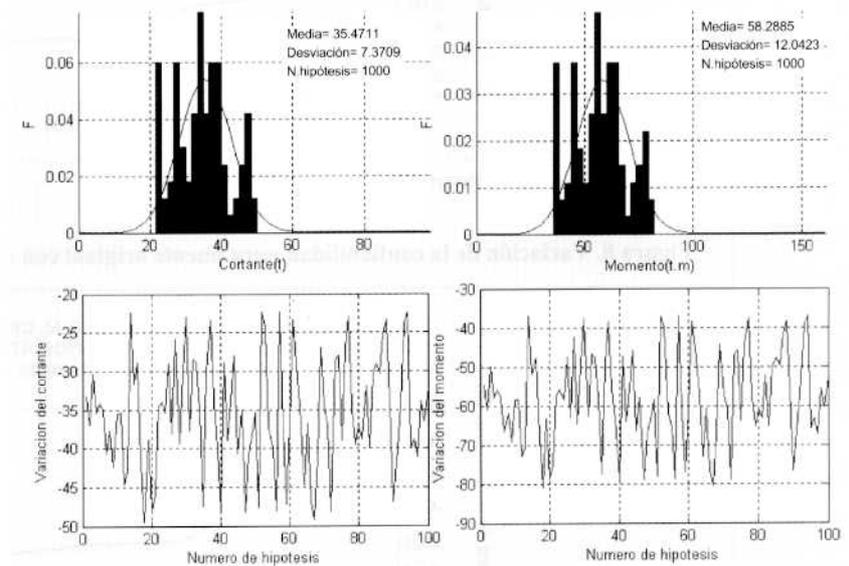
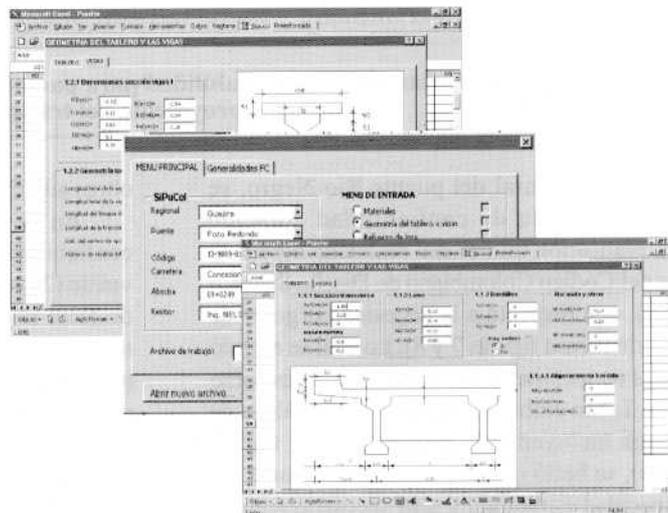


Figura 6. Caso de atasco, 100 hipótesis para una proyección de la carga de tráfico de 20 años

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA

Programa en visual Basic para excel (Muñoz, et.al, 1998), con interfase de resultados en MATLAB® (The MathWorks, 2002).



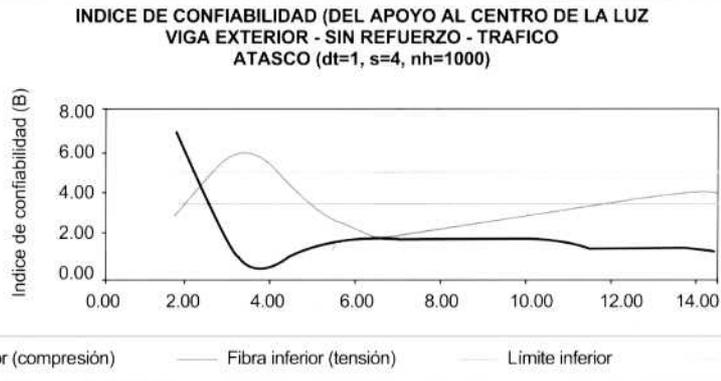


Figura 7. Variación de la confiabilidad para el puente original sin incluir refuerzo adicional

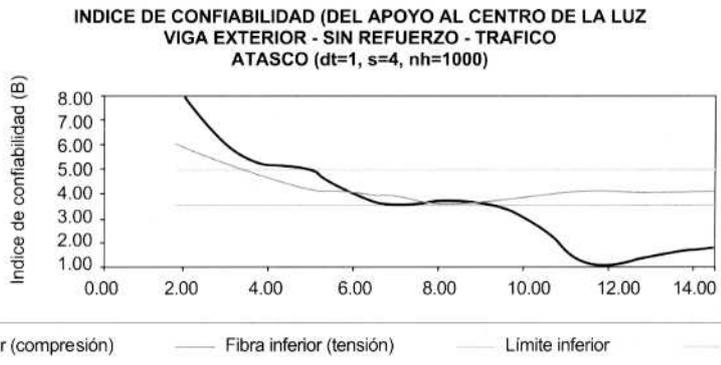


Figura 8. Variación de la confiabilidad para puente original con refuerzo consistente en cables exteriores

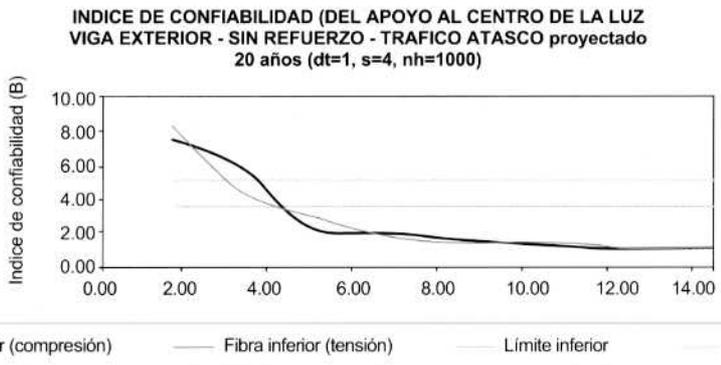


Figura 9. Variación de la confiabilidad para puente original con refuerzo adicional y con una proyección del tráfico de 20 años

De la evaluación estructural del puente Río Negro, se concluye que la metodología de confiabilidad coincide inicialmente con la evaluación tradicional realizada mediante las especificaciones del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP), con respecto a la necesidad urgente de reforzarlo y actualizarlo (véase figuras 7 y 8). Lo cual se ejecutó en el año 2000, mediante un sistema de cables exteriores como se observa en la foto 1. Sin embargo, mediante un análisis de la capacidad de carga incluyendo la proyección del tráfico (2,5,10,15 y 20 años), se halló que el puente en el futuro, no cumplirá con su capacidad estructural y será necesario realizar

obras adicionales de reforzamiento (véase Figura 9).

En la Figura 9 se observa la variación del índice de confiabilidad, que se evaluó con una proyección del tráfico a veinte (20) años. De lo anterior, se deduce que la probabilidad de falla no se encuentra dentro de los límites permisibles recomendados por las especificaciones de Europa y que es necesario su actualización. Se recomiendan por lo tanto inspecciones rutinarias, con el objeto de verificar su comportamiento estructural contra el tiempo, lo cual servirá como un criterio adicional para decidir su reforzamiento complementario.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo es una semilla importante desde el punto de vista de investigación para el avance de la ingeniería de puentes. Esta herramienta computacional y matemática, es novedosa con el objetivo principal de evaluar por confiabilidad y riesgo la capacidad de carga de los puentes. Como se mencionó antes por información insuficiente, se genera mayor incertidumbre y por lo tanto una dificultad en el proceso de priorización y en la toma de decisiones en las labores de rehabilitación. Por lo anterior, se agregó el aspecto de análisis de riesgo y el método de toma de decisiones, relacionada con los resultados de la confiabilidad para optimizar los recursos que son escasos en nuestro país. Se sugiere, basados en los resultados del proyecto de investigación y del estudio de los diferentes casos utilizando esta metodología, hacer una revisión detallada de la carga de diseño (C40-95). Se justifica esta recomendación, considerando adicionalmente el problema de los sobrepesos que siguen afectando las obras de la infraestructura vial (puentes, pontones, pavimentos, etc) como se observa en la Figura 3.

El uso de las técnicas de confiabilidad estructural para la evaluación y el refuerzo de estructuras existentes y la calibración de códigos, se viene empleando especialmente en Europa. Se recomienda su implementación y adaptación en los países de América Latina, con el objeto de disminuir el riesgo de falla o colapso de puentes y para priorizar los recursos disponibles para la conservación de las obras de infraestructura vial. La metodología y el programa desarrollado, pueden ser implementados en los países de América Latina, basándose en sus sistemas constructivos, tipología y estado de sus puentes, calidad de los materiales y el tráfico real.

5. REFERENCIAS

- DAZA, R., OBREGÓN, N. y MUÑOZ, E. (2002), "Técnicas de confiabilidad estructural para la evaluación de puentes existentes, mediante la simulación numérica del método de Montecarlo y modelos en elementos finitos", IV Congreso Colombiano de Elementos Finitos y Modelamiento Numérico, Bogotá D.C., Universidad Nacional de Colombia.
- DAZA, R., SALAZAR, F. y MUÑOZ, E. (2002), "Metodología de evaluación estructural de Puente Metálico por técnicas de fiabilidad estructural", Revista Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile., Volumen 17, paginas 44 a la 52.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EUROCODE (1993), Basic of Design and Actions on Structures, Vol 3. Loads of Bridge. 10th draft.
- MUÑOZ, E., BETANCOUR, N., GONZÁLEZ, S. y SÁNCHEZ, R. (1998), "Programa en visual Basic para excel para la revisión de puentes de viga y losa en concreto reforzado y preesfrozado", Instituto Nacional de Vías.
- PEDELTA, S.L.(1999), "Informe de Evaluación de la Seguridad Estructural del Puente Luis Ignacio Andrae(Colombia)", Barcelona, España.

- SOBRINO, J. y CASAS, R. (1993), "Metodología de Evaluación Estructural de Puentes Existentes: Aplicación a un caso Real", Hormigón y Acero. Barcelona. UPC. IV Trimestre.
- SOBRINO, J. (1998), "Acciones en Puentes.", XIV Curso de Estudios Mayores de la Construcción. Instituto de Ciencias de la Construcción Instituto Torroja. Madrid, España. pp 1-12
- TANER, P. y SOBRINO, J. (1998), "¿Cuánta Seguridad Necesitan las Estructuras? Calibración de Códigos.", XIV Curso de Estudios Mayores de la Construcción. Instituto de Ciencias de la Construcción Instituto Torroja. Madrid, España. pp 19-30.
- THE MATHWORKS (2002), "MATLAB The Language of Technical Computing".

APENDICE

Términos de organismos y normas Colombianas:

INVIAS: Instituto Nacional de Vías

SIPUCOL: Sistema de Administración de Puentes de Colombia.

CCDSP: Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes.

C40-95: Camión de diseño de puentes. Consiste en un tren de cargas de tres (3)

Ejes: El eje delantero es de 10 toneladas y los dos(2) ejes traseros son de 15

Toneladas cada uno, para uno total de 40 toneladas. Su separación longitudinal entre ejes es de 4 metros y transversal entre ruedas es de 1.8 metros.

Edgar Muñoz

*Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C. Colombia*

Jorge Alonso Prieto

*Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C. Colombia*

Nelson Obregón

*Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C. Colombia*