

Confiabilidad estructural apoyada en monitoreo e instrumentación: aplicación en un puente en acero

Structural reliability supported in monitoring and instrumentation: application in a steel bridge

Edgar Muñoz*, Federico Núñez*, Wilson Rodríguez*, Camilo Otalora*, Daniel Ruiz*

* Grupo Estructuras. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, COLOMBIA
edgar.munoz@javeriana.edu.co

Fecha de recepción: 11/ 01/ 2006
Fecha de aceptación: 15/ 06/ 2006
PAG. 43 - 56

Resumen

En este documento se expone el análisis por confiabilidad estructural basado en instrumentación del puente Puerto Salgar, considerado uno de las obras viales más importantes de Colombia. Dicho trabajo incluyó: levantamiento geométrico, ensayos mecánicos, conteo del tráfico, prueba de carga, optimización y calibración del modelo estructural, instrumentación, monitoreo y simulación numérica. Basados en la confiabilidad estructural, se encontraron probabilidades de falla en algunos elementos principales de este puente, que no están dentro del rango de seguridad que garantice su estabilidad total. Además se detectaron sobrecargas importantes sobre algunos elementos del puente, que afectan su seguridad y que deben ser objeto de control por parte de la entidad responsable. Por otro lado se encontró prioritario hacer la revisión de la carga de diseño de puentes, especificada por el código Colombiano, ya que genera solicitudes internas menores a las reales medidas en campo. Finalmente en este proyecto se demuestra las utilidades y ventajas, de emplear el método de confiabilidad estructural apoyada en instrumentación, para la revisión de puentes existentes en acero.

Palabras Clave: Confiabilidad, Monitoreo, Simulación, Puentes, Acero, Optimización

Abstract

This article presents an analysis by structural reliability based on instrumentation applied to the bridge Puerto Salgar, considered one of most important of Colombia. This work included: surveying, mechanical testing, traffic counting, load test, optimization and calibration of the structural model, instrumentation, monitoring and numerical simulations. Based on the structural reliability analysis, there were probabilities of failure in some main elements of this bridge since they were not within the safety range that guarantees stability. In addition, important overloads were detected on some elements of the bridge which must be taken care of by the responsible organization since they affect the bridge safety. Additionally, it is recommended the review of Colombian code design loads for bridges since it assumes lower stresses than those measured on the field. Finally, this project showed the advantages of using method of structural reliability based on instrumentation for the revision of existing steel bridges.

Keywords: Reliability, Monitoring, Simulation, Bridges, Steel, Optimization

1. Introducción

El Grupo de investigación de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil, está trabajando desde hace tres (3) años en las técnicas de confiabilidad estructural, sistemas de monitoreo e instrumentación y estudios especializados de patología y durabilidad para la evaluación de puentes existentes (Muñoz, 2001; Muñoz, et al., 2002; Muñoz, et al., 2004a; Muñoz et al., 2004b; Muñoz et al. 2005). Las primeras evaluaciones mediante las técnicas de confiabilidad estructural, se realizaron mediante simulaciones numéricas (Método de Montecarlo), basadas en la información existente sobre pesajes y

conteos del tráfico suministrados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Se decidió tener mayor certeza de los efectos de las cargas reales y se realizó la evaluación de uno de los puentes más importantes de Colombia, por donde circula la mayor cantidad de carga pesada, apoyados en un sistema electrónico de monitoreo e instrumentación. Además se realizó la prueba de carga sobre este puente para calibrar su modelo estructural y tener mayor certeza en las labores de simulación numérica y los cálculos de los índices de falla empleando la confiabilidad estructural.

2. Desarrollo del trabajo

En la Figura 1 se presenta un flujo grama con las etapas del proyecto, las cuales se explican a continuación:

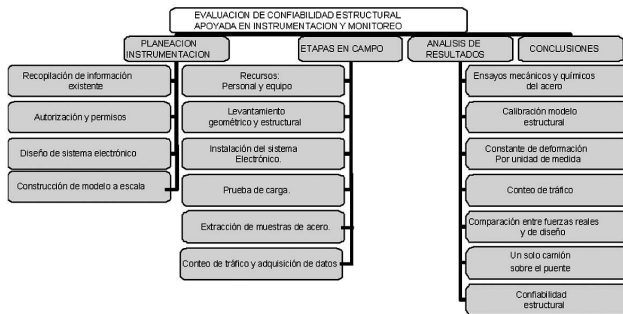


Figura 1. Flujo grama del proyecto

2.1 Planeación de la instrumentación

2.1.1 Recopilación de información existente

Se recopiló y estudió la siguiente información técnica existente del puente seleccionado:

- Datos de la geometría general (elementos, uniones, tipo de losa, apoyos y otros)
- Propiedades mecánicas.
- Ensayos de patología destructivos y no destructivos.
- Información histórica y actual del tráfico.
 - o Censos
 - o TPDs
 - o Pesajes
 - o Configuración de los camiones
 - o Distancia entre ejes
- Planos de diseño, de construcción y/o de rehabilitación.
- Memorias de cálculo de la superestructura e infraestructura.
- Informes de construcción e interventoría.
- Informes de inventario, inspección principal y especial.
- Estudios anteriores de mantenimiento, rehabilitación y/o refuerzo.

2.1.2 Autorización y permisos

Se solicitó al Instituto Nacional de Vías (INVIAS) permiso y autorización para el monitoreo e instrumentación del puente Puerto Salgar. Se obtuvo un apoyo logístico importante por parte del INVIAS y el Ejército para poder hacer realidad este proyecto.

2.1.3 Diseño del sistema electrónico para la instrumentación

El objetivo del sistema electrónico es medir deformaciones unitarias y fuerzas de los elementos

principales del puente, cuando es sometido a carga durante su operación normal y almacenar dichos datos en tiempo real en un computador. Se diseñó el sistema para tomar esta información en diez (10) puntos de medida sobre la estructura, en cada uno de los cuales se instaló un elemento que se deforma solidariamente con la viga y con los elementos sensibles a la deformación: strain gages.

2.1.4 Construcción modelo a escala

Para la organización y planeación de las labores de campo y el monitoreo del puente Salgar, se realizó la construcción de su modelo a escala 1:25 (ver).

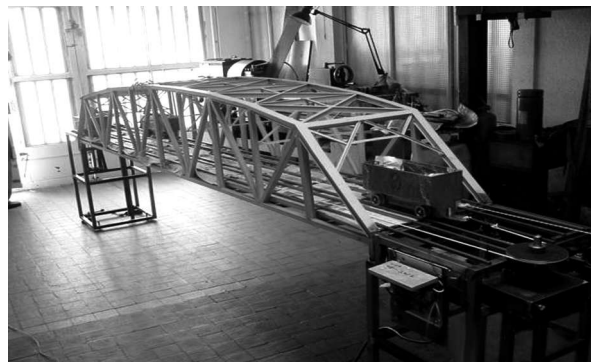


Figura 2. Modelo a escala 1:25 del puente Salgar

3. Etapas en campo

3.1 Personal en campo

El personal en campo constó del ingeniero jefe del proyecto, dos ingenieros coordinadores en campo, un ingeniero electrónico asesor, un ingeniero metalúrgico y dos (2) auxiliares de campo para la instalación. Para la instrumentación se emplearon los siguientes equipos y componentes: Cables de comunicación RS485 para comunicación multipunto, diez (10) strain gages y sus pegantes especiales, transformadores y reguladores de voltaje, diez (10) platinas de acero de 1/2" de espesor para anclaje, un equipo de soldadura para instalación de los diez (10) platinas. Además un medidor de espesores ultrasónico con una precisión de hasta 1/100 mm, una cámara de video, una cámara fotográfica, un nivel de topografía para la toma de deflexiones verticales, un equipo de oxicorte para la extracción de las muestras de láminas de acero y una báscula para medir la carga de las volquetas vacías y llenas para la prueba de carga.(ver Figura 3 y Figura 5).



Figura 3. Instalación de platinas con soldadura.



Figura 4. Platina para calibrar equipo de medidor de espesores.

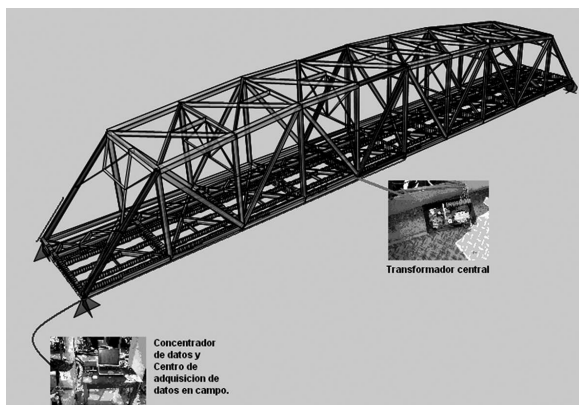


Figura 5. Localización de los elementos con los puntos de monitoreo.

3.2 Levantamiento geométrico y estructural

El puente consta de dos (2) calzadas para paso vehicular y una (1) para paso del tren. Es una estructura mixta (acero y concreto) compuesta por cuatro (4) naves iguales y una rampa curva de acceso (vigas en acero y

losa en concreto). El estudio se realizó solamente para la superestructura de una de las naves típicas, que corresponde a la primera a partir de Honda – Puerto Boyacá. Esta es una estructura de armaduras de paso inferior, con una losa en concreto reforzado. De esta nave, se realizó el levantamiento detallado de sus elementos principales, empleando el equipo de medidor de espesores ultrasónico, decámetro y cinta métrica.

3.3 Instalación del sistema electrónico

Los trabajos de instalación del sistema se pueden resumir de la siguiente manera:

- Localización de los diez (10) puntos de monitoreo en cada uno de los elementos seleccionados, incluyendo su posición en el mismo. Su selección se basó en los estudios anteriores (Muñoz y Valbuena, 2005) donde se realizó la evaluación por confiabilidad estructural a nivel analítico y se identificaron los elementos más críticos, con mayor probabilidad de falla.
- Instalación de las platinas bases en cada uno de los puntos, mediante soldadura.
- Instalación de las platinas principales con los respectivos strain-gages, los cuales fueron prefabricados en el laboratorio de electrónica.
- Conexión con el cable para conformar el sistema Multipunto.
- Pruebas en la instalación de cada punto de la toma de datos.
- Al dar las pruebas de verificación de funcionamiento del sistema electrónico, se procedió a proteger con aluminio cada uno de los puntos (platinas, strain gages y circuitos).

3.4 Prueba de carga

Se contrataron cuatro (4) volquetas, a las cuales se les realizó el pesaje vacío y cargadas, empleando el equipo y la báscula de la zona. Además se les realizó la medición de su geometría detallada (distancia entre ejes, peso entre ejes, etc). Las cuatro (4) volquetas empleadas fueron cargadas con el material más denso encontrado en la zona, para que produjeran el mayor efecto en la estructura y se pudieran identificar con la topografía. El objeto de la prueba es la calibración del modelo estructural de la nave del puente Salgar, conociendo tres (3) condiciones de frontera:

- o La posición e intensidad de cargas
- o La deformación vertical que generan en las diferentes posiciones mediante las mediciones de topografía.
- o La medición de los deltas de voltaje con los strain gages.

Para tal fin se diseñaron y realizaron en campo tres (3) combinaciones para la prueba de carga (ver Figuras 6 y 8). Inicialmente el puente sin cargas, con el objeto de evaluar el nivel cero, mediante los equipos de topografía. Mediante equipos de topografía se tomó la deformación vertical en los once (11) puntos del cordón inferior de la armadura aguas arriba, para cada una de las hipótesis de carga antes explicada.



Figura 6. Primera condición de carga



Figura 7. Segunda hipótesis de carga



Figura 8. Tercera hipótesis

3.5 Extracción de muestras de acero del puente

Utilizando un equipo de oxicorte, se extrajeron seis (6) muestras de acero de algunos elementos secundarios del puente, asegurando que no generaran alguna deficiencia estructural. Estas platinas recuperadas tienen una sección de 25cm x 40cm, con el objeto de cumplir con las especificaciones para ensayos mecánicos de la norma ASTM E34 para los respectivos ensayos.

3.6 Cuento de Tráfico y adquisición de datos

Consistió en el conteo de tráfico que circulaba durante las mismas horas en las que se estaba haciendo la adquisición de datos del sistema electrónico instalado. Esta actividad pretendió hacer un muestreo de la condición de flujo de camiones sobre el puente y posteriormente hacer simulación numérica sobre el modelo estructural del puente calibrado. Los formatos con los que se tomaron los registros, permitían hacer la consignación del tipo de camión, la hora en que cruzó y la velocidad con la que pasó hacia la entrada del puente.

4. Analisis de resultados

4.1 Ensayos mecánicos del acero

Las platinas que fueron extraídas de los elementos del puente se le realizaron los ensayos mecánicos, químicos y de metalografía (ver Figura 18). Esta información además de servir como datos esenciales para la calibración del modelo y evaluar las curvas de probabilidad de resistencia de los elementos en estudio, servirá para trabajos futuros de investigación, tales como: El estudio del fenómeno de la fatiga y sistemas de refuerzo de rehabilitación de los componentes del puente.

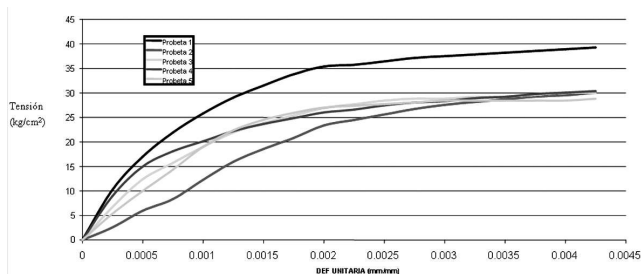


Figura 9. Curvas esfuerzo-deformación de las platinas extraídas y ensayadas

En la se observa una variabilidad importante del límite de fluencia y el módulo de elasticidad del acero de este puente. Esto se debe posiblemente a las diversas reparaciones y/ ampliaciones que ha tenido dicha estructura (durante 55 años de existencia), de las

cuales existen muy pocos registros oficiales. Otra razón pueden ser los imprevistos y cambios que existieron durante su proceso constructivo, teniendo en cuenta que fue construida en 1950 por una firma Alemana empleado acero importado. Afortunadamente esta variabilidad en las propiedades del acero, que presenta esta estructura, las tiene en cuenta el análisis de confiabilidad estructural realizado.

4.2 Calibración del modelo estructural

Se calibró el modelo estructural del puente basado en los resultados de las prueba de carga, con el objeto de mejorar el análisis con técnicas de confiabilidad estructural sobre el puente mediante simulaciones numéricas. Además para realizar una verificación de los componentes electrónicos instalados, se realizaron dos (2) modelos estructurales, uno en el programa de análisis estructural SAP-2000 y otro en el programa ANSYS empleando algoritmos de optimización para la correspondiente calibración. En este proceso se emplearon las mediciones de los espesores de la losa en concreto reforzado y su módulo de elasticidad. Esta última información fue suministrada por la empresa interventora que trabajó en su reconstrucción, ya que dicha losa se cambio en 1999.

4.2.1 Modelo estructural en SAP-2000

Se complementó y mejoró el modelo estructural desarrollado en SAP-2000 en el año 2002 (Daza y Salazar, 2002), basados en el levantamiento estructural detallado y las propiedades mecánicas determinadas (ver Figura 11). El modelo estructural desarrollado en SAP2000 consta de 220 nudos, 2754 elementos finitos discretos ("frame") y 6840 elementos finitos continuos ("shell"). Con los elementos finitos discretos se modelaron los miembros de las armaduras y de las vigas que hacen parte del tablero. Así mismo con los elementos finitos continuos ("shell"), se modeló la losa en concreto. El modelo se cargó con las fuerzas conocidas de las volquetas empleadas en la prueba de carga y con las posiciones que se muestran en las diferentes hipótesis. El proceso de calibración se basó en la comparación entre las deformaciones verticales obtenidas en campo (mediante topografía) y las del modelo estructural (Prueba y error). Después de diferentes pruebas y ajustes, se logró un promedio de calibración del 90.3%, lo que representan un 9.7% de diferencia entre los datos medidos en campo y las estimaciones analíticas. El término promedio de calibración, se obtuvo al analizar la diferencia que se presentó en cada punto, entre las deformaciones verticales medidas con respecto a las deformaciones verticales obtenidas en el modelo estructural.

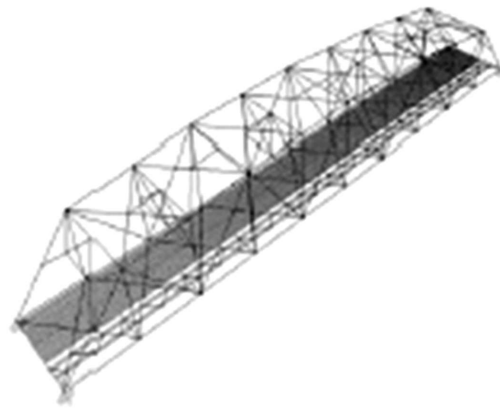


Figura 10. Modelo estructural en SAP-2000 del puento Puerto Salgar

4.2.2 Modelo estructural en ANSYS

Se realizó la calibración del modelo empleando técnicas de optimización en el programa de elementos finitos – MEF ANSYS (ver Figura 11). Se realizaron las siguientes etapas: definición de función objetivo (deformaciones), definición de variables de diseño y definición de variables de estado. Basados en esto se concluyó que el modelo estructural debe tener una altura de la losa de 18.86 cm y un módulo de elasticidad de 2182875 MPa. En la Figura 11 se muestra los gráficos de isocontornos en ANSYS de la solución de deflexión vertical. La comparación y las diferencias para verificar el nivel de calibración del modelo, empleando los programas SAP2000 y ANSYS se presentan en Figura 12.

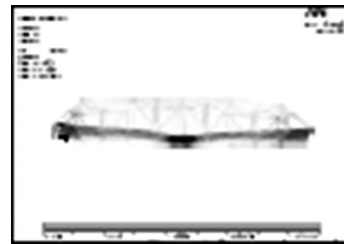


Figura 11. Modelo en SAP2000 y ANSYS del puento Puerto Salgar



Figura 12. Comparación entre deformación vertical de campo y analítica

4.3 Descripción y conteo del tráfico

Se encontró que el camión que más ocurrencia tiene sobre el puente es el C2, con un 58 % en el sentido la Dorada- Puerto Salgar y un 55 % en el sentido Puerto Salgar – La Dorada, de acuerdo con la actividad de conteo del tráfico. Este camión tiene solamente un efecto local sobre los componentes del puente, como la losa en concreto reforzado o las vigas longitudinales y transversales presentes en el tablero. Los camiones C3S3 y C3S2 que más afectan estructuralmente el puente, tienen un ocurrencia de 20% y 14% en el sentido de la Dorada- Puerto Salgar respectivamente. Y en el sentido Puerto Salgar – La Dorada tienen una ocurrencia de 20% y 17% respectivamente. La velocidad de operación es diferente en cada uno de los sentidos del tráfico, debido a que las condiciones de aproximación a este son diferentes en cada caso. En el sentido Puerto Salgar – La Dorada, la situación después de un terraplén de aproximación es recta, por lo cual llegan con una velocidad promedio de 26 Km/h. El puente es angosto, lo que hace que funcione un solo carril de circulación donde los camiones operan a muy baja velocidad ocasionando atasco. Las características de los camiones antes mencionados se presentan en la Figura 13, y Figura 15. Los conteos se realizaron durante todo el día, incluyendo los días y horas pico.

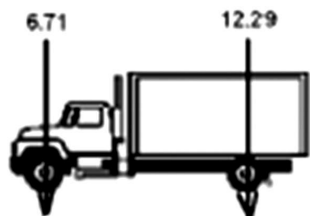


Figura 13. Camión tipo C2, con las cargas por eje en toneladas

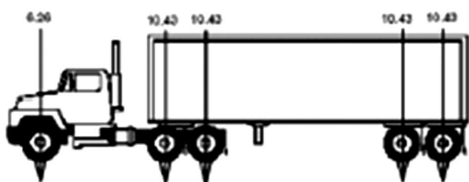


Figura 14. Camión tipo C3-S2, con las cargas por eje en toneladas

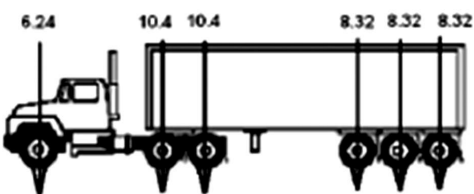


Figura 15. Camión tipo C3-S3, con las cargas por eje en toneladas

4.4 Comparación entre fuerzas internas reales y las de diseño

4.4.1 Carga de diseño

El Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP) especifica como camión de diseño para Colombia el C40-95 (Camión de tres(3) ejes separados cada 4 m, con una carga delantera por eje de 10 ton y dos(2) traseras de 15 ton cada una), el cual fue determinado por la Asociación de Ingeniería Sísmica de Colombia (AIS) y ratificado por un estudio elaborado por la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) en el año de 1997 que tiene por título: “Definición de las cargas de diseño para puentes en Colombia”.

4.4.2 Efectos sobre los elementos de de la Armadura aguas arriba

Se exponen a continuación los registros de fuerzas internas de los cuatro (4) elementos seleccionados de la armadura aguas arriba (ver Figura 16), comparadas con la carga de diseño o revisión (C40-95) de puentes establecida por el CCDSP. Basado en los registros de la instrumentación se encontró que el cordón inferior tiene un 10.19% de fuerzas internas mayores a las de diseño. Esto indica que la carga de diseño del CCDSP, no representa en forma suficiente lo que producen los camiones reales en la Red Vial Nacional. En menos proporción en los demás elementos de esta armadura, se identificó un sobrepeso con respecto a la carga de diseño.

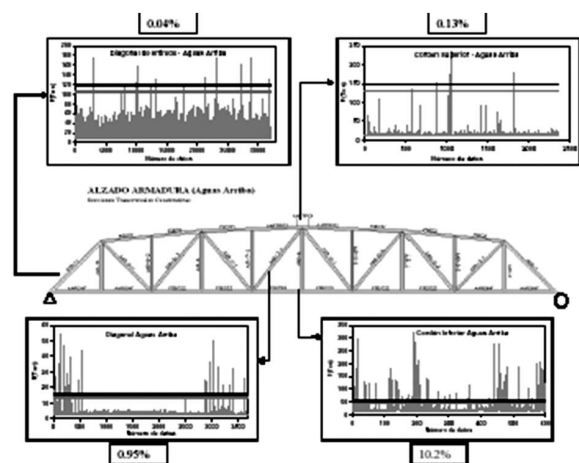


Figura 16. Picos máximos registrados en los elementos monitoreados Aguas Arriba

Tabla 1. Comparación entre las cargas reales de carga viva y las de diseño de los elementos de la armadura aguas arriba

Armadura aguas arriba	Datos de la instrumentación							
	Número total de cargas (leídas en rango determinado*)	Número de cargas mayores a las de diseño	Carga viva máxima real(ton)	Carga viva media real(ton)	Carga viva mínima real(ton)	Carga viva máxima de diseño(ton)	Carga máximo resistente(ton)	% Número de cargas mayores a las de diseño
Cordón superior	2361	3	258	21,2	12	148	757	0,13%
Cordón inferior	618	63	321	17,7	11	55	762	10,19%
Diagonal de entrada	38358	17	176	13,9	8	119	430	0,04%
Diagonal	3678	35	54	6,1	2	16	172	0,95%

En la Tabla 1 y en Figura 17 se presenta la relación entre las cargas vivas reales (máxima, media y mínima), obtenidas de la instrumentación, con la carga de diseño y la máxima que resiste. Se observa diferencias importantes, que comprueban la necesidad de la revisión del camión C-4095, el cual es normalmente utilizado por la ingeniería nacional para el diseño de puentes nuevos y la revisión de los existentes.

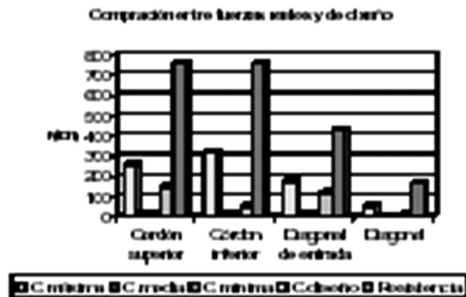


Figura 17. Comparación de fuerzas reales de la carga viva con las de diseño – Armadura aguas arriba

4.4.2 Efectos sobre los elementos de la Armadura aguas abajo

Igualmente que el caso anterior, se exponen los registros de fuerzas internas de los cuatro (4) elementos seleccionados de la armadura aguas abajo (ver Figura 18), incluyendo la correspondiente carga de diseño máxima. En la Figura 18, se resumen los resultados de la comparación de las cargas reales con las de diseño, encontrando que la diagonal tiene un 14% de fuerzas internas mayores a las de diseño. En una proporción del 1% al 6%, en los demás elementos de esta armadura aguas arriba, se sobrepasa su fuerza real interna con respecto a la carga de diseño (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Comparación entre las cargas reales de carga viva y las de diseño de los elementos de la armadura aguas abajo

Armadura aguas abajo	Datos de la instrumentación							
	Número total de cargas (leídas en rango determinado*)	Número de cargas mayores a las de diseño	Carga viva máxima real(ton)	Carga viva media real(ton)	Carga viva mínima real(ton)	Carga viva máxima de diseño(ton)	Carga máximo resistente(ton)	% Número de cargas mayores a las de diseño
Cordón superior	771	0	207	10,3	11	55	1362	0%
Cordón inferior	200	4	100	13,3	8	55	1362	1%
Diagonal de entrada	200	4	100	13,3	8	55	1362	1%
Diagonal	200	4	100	13,3	8	55	1362	1%

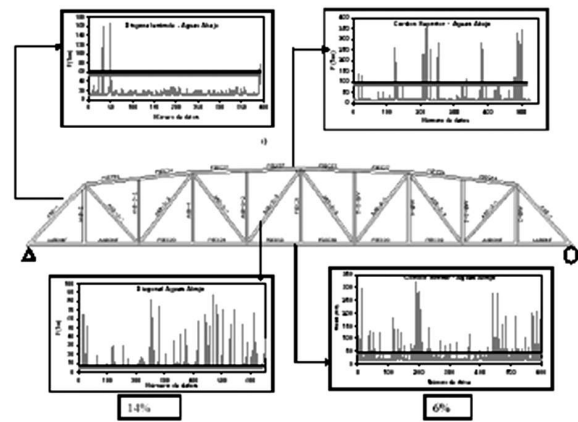


Figura 18. Picos máximos registrados en los elementos monitoreados Aguas Abajo

En la Figura 20 se presenta adicionalmente la relación entre las cargas vivas reales (máxima, media y mínima), obtenidas de la instrumentación, con la carga de diseño y la máxima de resistencia. Se observa diferencias importantes, que justifican la revisión urgente del camión de diseño C-40-95. Por último se presentan en la Figura 19 los factores de seguridad de los elementos de las armaduras, los cuales son mayores a 1 (varían entre 1 y 4). Sin embargo hay que tener en cuenta que este análisis no incluye la carga del tren, el cual no pasa actualmente por el puente, lo cual puede modificar este resultado.

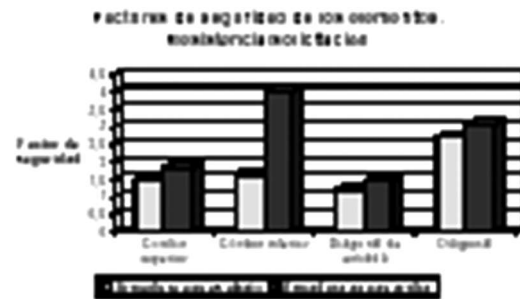


Figura 19. Factores de seguridad de los elementos de las armaduras del puente

4.5 Evaluación de un solo camión por el puente

En el proceso de monitoreo se decidió estudiar los casos de un solo camión en el puente, para poder evaluar (en forma aproximada) los efectos individuales de estos vehículos, e indirectamente poder determinar sus carga total y compararla con su carga límite legal. Para este se empleó la Resolución 004100 de 2004 el Artículo 9° del Ministerio de Transporte, la cual especifica la restricción de carga por ejes para las configuraciones de camiones tipificados. Los camiones y sus configuraciones de carga fueron modelados como cargas puntuales y cargados en el modelo del puente ya calibrado, en la posición aproximada en la cual estaba el camión, de acuerdo con los videos registrados durante el proceso de monitoreo. En la Figura 21, se presenta uno de los casos de comparación aproximada entre las fuerzas admisibles legales y las que realmente generan un solo camión. En este ejercicio en general se encontró un sobrepeso promedio del 15%. Se observa en la Figura 21, el tipo de camión especial detectado, que produce una carga muy alta mayor a la legal y que pone en riesgo la seguridad del puente.



Figura 21. Ejercicio completo de monitoreo de un solo camión

4.6 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). Definidos como la inversa de la función normal estándar acumulativa de la probabilidad de falla (P_f):

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

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 sollicitación (S). Cuando la función G 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 sollicitación, estas son tomadas como variables aleatorias con su correspondiente distribución de probabilidad. Para el caso de las variables aleatorias distribuidas R y S , se asume funciones de probabilidad de distribución, así como no correlación entre ellas. El margen de seguridad se puede expresar como:

$$G = R - S = 0 \quad (3)$$

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:

$$m_G = \beta \cdot S_G \quad (4)$$

$$\beta = \frac{m_G}{S_G} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{S_R^2 + S_S^2}} \quad (5)$$

Donde:

m_R , m_S , corresponde a las medias de la distribución de la resistencia y las sollicitaciones.

s_R , s_S , corresponde a las desviaciones estándar de la distribución de la resistencia y las sollicitaciones.

No existe en Colombia un estudio que establezca

los rangos admisibles de probabilidad de falla, por lo cual se empleó el que especifica el EUROCODE, basados en el documento No. 1 Vol. 3 "Traffic loads on bridges" ($10^{-4} \leq Pf \leq 10^{-6}$), donde se dedujeron los límites del índice de confiabilidad que varían entre $3.5 \leq 4.5$. Mediante la ecuación 5 se determinaron el índice de confiabilidad (β), la cual se puede utilizar aún para funciones de distribución de probabilidad diferentes a la normal con resultados satisfactorios. Para el análisis por confiabilidad estructural se seleccionaron las curvas de densidad de probabilidad (Normal, logística, Log-normal, valor extremo, etc), que mejor se ajustan a las funciones de resistencia y sollicitación, empleando la técnica de bondad del ajuste para la curva de densidad de probabilidad acumulada de Kolgomorov-Smirnov. Dicha afirmación se basa en las recomendaciones de algunos autores internacionales (Mays y Tung, 1992; Ang. A.H-S, 1973), los cuales consideran este procedimiento como aproximado con un error mínimo y aceptable. Sin embargo esta consideración se comprobó analíticamente en el presente artículo (para algunos de los casos de evaluación de índices de falla), empleando integración numérica y la determinación de la curva resultante G. Se calculó la probabilidad de falla, la cual corresponde al área bajo de la curva G, que se encuentra entre $-\alpha$ y el punto cero (0), es decir, la zona cuando la curva de sollicitación (S) supera a la de resistencia (R). Además se determinó la media y la desviación estándar de la función resultante G y se normalizó. Posteriormente se determinó el índice de confiabilidad (β), que es el inverso del coeficiente de variación del margen de seguridad.

4.6.1 Resistencia

Se evaluaron las curvas de probabilidad de resistencia de cada uno de los elementos de las armaduras que se seleccionaron para monitorear e instrumentar. Con el objeto de tener mayor información estadística del módulo de elasticidad (E) y el límite de fluencia (f_y), fue necesario generar valores aleatorios ajustados a una función normal, usando el método de los números aleatorios (Método de Montecarlo). (ver Figuras 22 y 23).

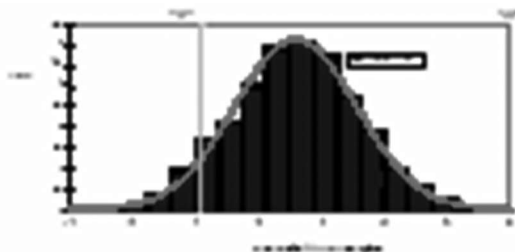


Figura 22. Ajuste de datos simulados de Módulo de Elasticidad

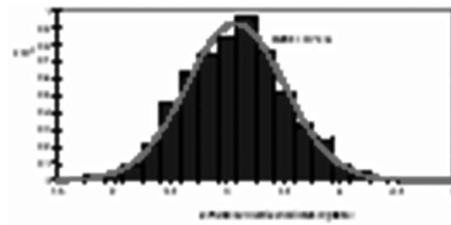


Figura 23. Ajuste de datos simulados de Esfuerzo de Fluencia

Para evaluar la resistencia a tensión y a compresión de los elementos de acero de las armaduras, se empleó el método tradicional de esfuerzos admisibles estipulado en el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP).

4.6.2 Solicitación

Se realizaron las curvas de probabilidad de sollicitación de los ocho (8) elementos instrumentados de las armaduras aguas abajo y arriba. Los tipos de curvas fueron seleccionadas basados en los procedimientos estadísticos de ajustes, empleando la técnica acumulada de Kolgomorov-Smirnov. En las siguientes figuras se presentan los cuatro (4) elementos de la armadura aguas arriba.

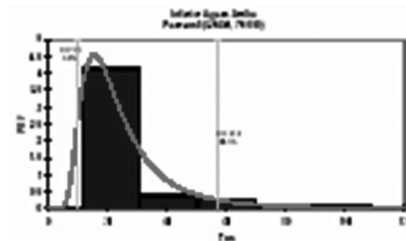


Figura 24. Histograma y curva de probabilidad de las fuerzas axiales del cordón inferior - armaduras aguas arriba

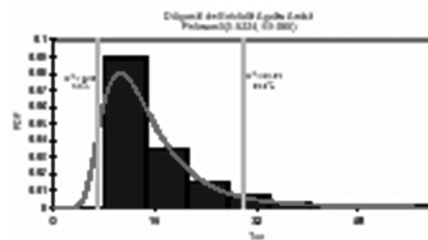


Figura 25. Histograma y curva de probabilidad de las fuerzas axiales de la diagonal de entrada - armadura aguas arriba

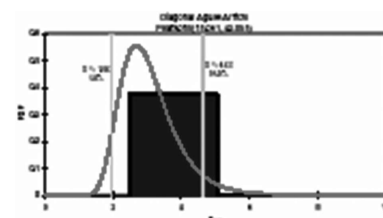


Figura 26. Histograma y curva de probabilidad de las fuerzas axiales de la diagonal - armadura aguas arriba

Tabla 3. Índice de falla de los elementos de las armaduras

Tipos de elementos		Datos de instrumentación			Evaluación de resistencia(ensayos)			Índice de confiabilidad	
		Tipo de curva ajustada	Carga Muerta Adicional(ton)	Carga Total(ton)	Desviación estándar (ton)	Tipo de curva ajustada	Carga media del ajuste (ton)		Desviación estándar (ton)
ELEMENTOS DE ARMADURA AGUAS ABAJO									
Cordón superior	Compresion	Pearsons5	254.11	275.32	12.34	LogLogistica	1070.60	164.24	4.83
Córdon inferior	Tension	Pearsons5	133.60	151.27	8.22	Beta	1254.50	175.36	6.28
Diagonal de entrada	Compresion	Pearsons5	173.51	187.43	4.92	Log Logistica	513.73	80.21	4.06
Diagonal	Compresion	Pearsons5	8.52	14.63	4.28	Log Logistica	263.47	47.72	5.19
ELEMENTOS DE ARMADURA AGUAS ARRIBA									
Cordón superior	Compresion	Pearsons5	252.736	265.698	3.464	Log Logistica	783.85	116.62	4.44
Córdon inferior	tension	Pearsons5	82.78012	108.613	18.529	Beta	762.37	106.56	6.04
Diagonal de entrada	Compresion	Pearsons5	194.56114	209.796	8.105	Log Logistica	412.26	64.99	3.09
Diagonal	Compresion	Pearsons5	7.71561	10.610	0.681	Log Logistica	149.68	29.16	4.77

4.6.3 Índices de confiabilidad

En las 3 se presentan los datos principales para esta evaluación, donde se incluye para cada elemento la curva de función de probabilidad que más se ajusta, los datos de la sollicitación (media y desviación estándar), la resistencia (media y desviación estándar) y el correspondiente índice de confiabilidad.

En la Figura 27 se presentan los índices de confiabilidad para cada elemento y en la Tabla 4 las probabilidades de falla correspondientes. Con base a la evaluación por confiabilidad estructural, se encontró que la diagonal de entrada de la armadura aguas abajo, tiene un índice de confiabilidad de 3.1 y una probabilidad de falla de 0.0097. Esto indica que el elemento no se encuentra en el rango de seguridad recomendado por EUROCODE, el cual corresponde a $3.5 \leq \beta \leq 4.5$.

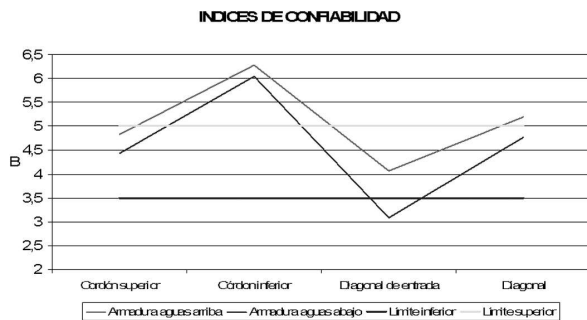


Figura 27. Índices de confiabilidad de los elementos de las armaduras del puente. Se incluye el rango admisible recomendado por el EUROCODIGO.

Sin embargo esta probabilidad de falla no incluye el efecto del tren, que en caso que se presente aumentaría, y por lo tanto aumenta su riesgo. Este elemento tiene una moderada preocupación de riesgo, por lo cual requieren medidas de prevención a mediana plazo. El resto de los elementos se encuentra con índices de confiabilidad entre 4.4 - 6.3, cumpliendo con las recomendaciones de seguridad del EUROCODIGO, lo que representa que tienen un grado sobredimensionamiento cuando no esta

activo el paso del tren y su riesgo actual es mínimo.

Tabla 4. Probabilidades de falla de cada elemento de cada armadura

Tipos de elementos	Índice de confiabilidad	Probabilidad de falla
Armadura aguas arriba		
Cordón superior	4,8	Entre 1.3E-6 y 2.8E-7
Córdon inferior	6,3	Entre 9.8E-10 y 4.0E-11
Diagonal de entrada	4,1	2,07E-05
Diagonal	5,2	Entre 2,8E-7 y 1,9E-8
Armadura aguas abajo		
Cordón superior	4,4	5,41E-06
Córdon inferior	6,0	9,86E-10
Diagonal de entrada	3,1	0,00097
Diagonal	4,8	Entre 1.3E-6 y 2.8E-7

Se evaluaron los índices de confiabilidad de cada uno de los elementos en función del tiempo de monitoreo e instrumentación (ver y 29). Se observa en forma general que la probabilidad de falla es constante, sin embargo se nota un cambio los días viernes y sábado, donde aumentó el tráfico y por lo tanto disminuyó el índice de confiabilidad (por lo tanto aumenta la probabilidad de falla).

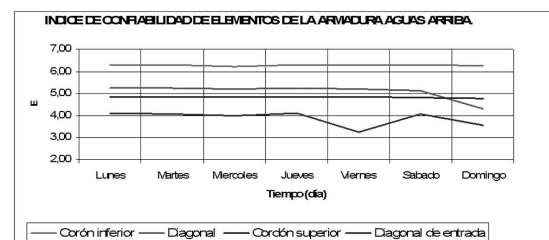


Figura 28. Índice de confiabilidad de los elementos armadura aguas arriba.



Figura 29. Índice de confiabilidad de los elementos armadura aguas abajo.



4.7.4 Comparación de confiabilidad basada en datos experimentales y analíticos

En el proyecto de investigación denominado: “Modelo de elementos finitos con simulación numérica para estimar la confiabilidad estructural parcial de puentes en estructura metálica (Muñoz, et al., 2005)”, se realizó el análisis de confiabilidad de este puente basado solamente en la información suministrada por el INVIAS y empresas consultoras (sin incluir instrumentación del puente, ni toma de muestras de los materiales para sus respectivos ensayos, etc). Los resultados de esta investigación coincidieron con este proyecto en algunos aspectos y en otros no, debido especialmente a las curvas de resistencia suministradas en el proyecto anterior, las cuales estaban basadas en pocos datos estadísticos de resistencia y módulos de elasticidad. También por la insuficiente información de tráfico (conteo y pesaje) que tienen las vías en Colombia, lo cual afecta sustancialmente dichos resultados. Al comparar los resultados de los dos (2) proyectos, se encontró que el que se basa en instrumentación y estudios rigurosos de los materiales, tiene mayores ventajas y utilidades para evaluar el estado y el riesgo de este tipo de estructuras.

Se realizó una calibración o comprobación de la simulación numérica para hacer evaluaciones de confiabilidad, sin los datos de instrumentación, empleando el modelo estructural calibrado, las curvas de resistencia (de acuerdo con los ensayos de materiales hechos en campo) y la información del estudio del tráfico (incidencia de los diferentes tipos de camiones en el puente en cada dirección). Las diferencias son menores, como se observa en la , donde se demuestra la posibilidad de hacer evaluaciones solamente analíticas, con resultados confiables, pero verificando rigurosamente la cantidad y consistencia de los datos estadísticos existentes (de sollicitación y resistencia).

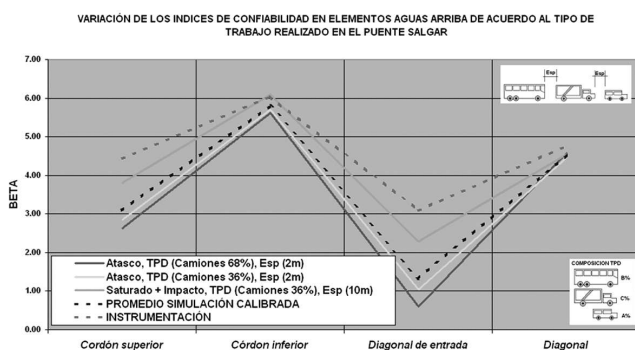


Figura 30. Comparación entre monitoreado y simulado en modelo calibrado

Este procedimiento es un insumo de investigación adicional, con el cual se pueden hacer análisis de confiabilidad mediante simulación numérica, incluyendo la proyección del tráfico y calculando los índices de confiabilidad a corto, mediano y largo plazo. Se convierte en un instrumento adicional para la toma de decisiones de las Entidades Públicas.

5. Conclusiones

El método planteado mediante técnicas de confiabilidad estructural apoyada con monitoreo e instrumentación, es una alternativa preventiva con una gran ventaja sobre el tradicional método determinístico que permite el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP) y que se viene aplicando inadecuadamente por parte de la ingeniería nacional, para evaluar la capacidad de carga de los puentes existentes. Basados en los datos de monitoreo y en los análisis de confiabilidad, se encontró lo siguiente:

- El cordón inferior de la armadura aguas abajo y la diagonal de la armadura aguas arriba, tienen un 10.2% y 14% respectivamente, de fuerzas internas (reales) mayores a las fuerzas de diseño. En los demás elementos de las armaduras se pasa la carga real con respecto a la carga de diseño, en un rango de (0.05%-6%). Es importante aclarar que se obtuvieron estos resultados, haciendo comparaciones entre sollicitaciones y resistencias de servicio, sin incluir factores de mayoración y de reducción respectivamente.
- La anterior afirmación comprueba que la carga de diseño C40-95 del Código Colombiano de Diseño sísmico de puentes (CCDSP), no representa en forma suficiente lo que producen los camiones reales que transitan por este puente.
- Esta sobrecarga es una de las causas principales de los daños y deterioro en los componentes principales de los puentes y los pavimentos. Esto afecta su vida útil y puede generar colapsos parciales o totales de sus componentes. Implica para el estado mayores recursos económicos para su mantenimiento y rehabilitación, que en muchos casos son insuficientes.
- Al evaluar el paso de un solo camión por el puente, se observa un sobrepeso evidente, que produce un riesgo alto y que pone en entredicho la seguridad del puente. Se encontró en forma aproximada, un sobrepeso promedio del 15%, al evaluar los ocho (8) elementos monitoreados del puente.
- La diagonal de entrada de la armadura aguas abajo, tiene un índice de confiabilidad (β) de 3.1 y una probabilidad de falla de 0.0097, basados en la

evaluación mediante técnicas de confiabilidad estructural apoyada en monitoreo. Esto representa un elemento principal del puente, que tiene una seguridad no adecuada y que no se encuentra dentro del rango de seguridad que recomienda el EUROCODE ($3.5 \leq \beta \leq 4.5$). Sin embargo esta probabilidad de falla no incluye el efecto del tren, que en caso que se presente aumentaría el riesgo sobre la estructura. Es un elemento con una moderada preocupación de riesgo, que implica medidas de prevención a mediano plazo, relacionada con el control del tráfico sobre el puente.

- El resto de los elementos de las armaduras se encuentra con índices de confiabilidad entre 4.4 y 6.3, cumpliendo con las recomendaciones de seguridad del EUROCODIGO, lo que significa que representa un riesgo mínimo de falla sin tener en cuenta el efecto del tren.
- Basado en los resultados de confiabilidad obtenidos, algunos elementos del puente tienen un riesgo de colapso (total o parcial), el cual depende de las medidas de prevención que adopte la entidad, con relación al control de las cargas de tráfico y la activación del paso del tren.

Este trabajo es una semilla inicial de la investigación, el cual estuvo sujeto a las limitaciones de presupuesto, suministrado en su totalidad por parte de la Universidad muchos aspectos de esta investigación se pueden en un futuro complementar y mejorar, en la medida que existan mayores recursos. Inclusive estamos dispuestos a lograr convenios con las entidades públicas y/o Colciencias, para poder realizar monitoreo de los puentes incluyendo sistemas de pesaje en movimiento.

Finalmente este trabajo de investigación es muy pertinente para las necesidades del País y es similar a algunos proyectos realizados a nivel internacional ((Sobrinó, Juan A, et.al, 1993), (Esteva Luis, 2005), (Gómez Consuelo, et.al. 1993) y (Ventura Carlos, 2001)).

2. Recomendaciones

- Se recomienda incrementar por parte del INVIAS, el control de las cargas reales sobre los puentes y pavimentos, mediante la instalación de sistemas de pesaje estáticos y en movimiento en las carreteras principales de la red Vial Nacional. Es indispensable incrementar la información estadística de los pesajes, que corresponde a uno de los insumos principales para los análisis de confiabilidad y para investigar la capacidad de carga de los puentes a corto, mediano y largo plazo.
- Es prioritario hacer una revisión de la carga de diseño de puentes, ya que se demostró que generan fuerzas internas menores (en algunos casos) comparadas con

las reales.

- Es indispensable implementar para Colombia, una norma para la evaluación de capacidad de carga de puentes existentes, basados en las investigaciones realizadas por este Grupo de Estructuras y de acuerdo con el estado del arte mundial.
- Con base en los resultados de esta investigación, se justifica que el INVIAS emprenda labores de monitoreo e instrumentación de los principales puentes existentes del país. Además que realicen la instrumentación de los puentes nuevos en construcción.
- Como trabajo futuro, se recomienda hacer la revisión mediante confiabilidad estructural y apoyada en monitoreo, del fenómeno de la fatiga en las uniones de los puentes de acero.

7. Agradecimientos

Los autores expresan agradecimiento, por el apoyo de parte del Instituto Nacional de Vías y la Base militar de Puerto Salgar.

8. Referencias

- Ang, A.H.S. (1973), "Structural Risk Analysis and Reliability-Based Design". En: Journal of Structural Engineering Division, 99, 20-35.
- CCDSP (1995), Colombia. Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes. Bogotá: Invías.
- Esteva L. (2005), "Análisis de confiabilidad en el diseño sísmico de presas", Seminario sobre evaluación de riesgos en presas, Acapulco, 2005.
- Gómez C., Olle S., y Barbat A. H. (2002), "Evaluación de vulnerabilidad sísmica del puente warth (Austria) mediante un modelo simplificado", Revista Internacional Métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, Barcelona, España, 118(3).
- Daza, R.D., Salazar, F. (2001), Metodología de evaluación de puentes metálicos. Trabajo de grado para obtener título de Ingeniero Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Mays L.,Tung, Y. (1992), Hydrosystems Engineering and Management. McGraw Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. New York: Mc Graw Hill.
- Muñoz, E.E. (2001), "Estudio de las causas del colapso de algunos puentes de Colombia". En: Ingeniería y Universidad, 6 (1), 2001, 33-47.
- Muñoz E.E., Daza R.D., Salazar F. (2002), "Metodología de evaluación estructural de puentes metálicos por técnicas de fiabilidad estructural". En: Ingeniería de Construcción,

17 (1), 44-52.

Muñoz E.E., Prieto J.A. (2004), Obregón, N. "Evaluación de puentes existentes mediante confiabilidad parcial. Aplicación para un puente en concreto preesforzado".

En: Ingeniería de Construcción, 18 (3), 157-163.

Muñoz E.E, Valbuena E.A., Hernández, R. (2004), "Estado y daños típicos de los puentes de la red vial nacional, basados en inspecciones principales". En: Rutas, 104, 29-41.

Muñoz E.E, Valbuena E.A. (2005) "Evaluación de un puente en acero mediante criterios de confiabilidad parcial". En: Rutas, 110, 49-60.

Muñoz E.E, Núñez F., Rodríguez W., Otálora C., Ruiz D. (2005), Evaluación por confiabilidad estructural de puentes en acero apoyada en monitoreo e instrumentación. II Congreso Iberoamericano de Ingeniería Civil. Mérida, Venezuela, 2005.

Nowak A.S., Collins K.R. (2000), Reliability of Structures. Mc Graw Hill Civil Engineering Series. New York: Mc Graw Hill, 2000.

Sobrino J. A. (1993), Casas R. "Metodología de evaluación estructural de puentes existentes: aplicación a un caso real". En: Hormigón y Acero, IV, 1993, 107-124.

Tanner P., Sobrino J. A. (1998), "¿Cuánta seguridad necesitan las estructuras? Calibración de Códigos". En: Curso de Estudios Mayores de la Construcción. Fiabilidad Estructural. Tratamiento de las Acciones Especiales. Barcelona: s.e.EDITORIAL.

Tanner, P., Sobrino, J. A. (1998), "Acciones en puentes". En: Curso de Estudios Mayores de la Construcción. Fiabilidad Estructural. Tratamiento de las Acciones Especiales. Barcelona: s.e.EDITORIAL.

Ventura C. (2001), "Instrumentación y análisis experimental de estructuras: modelación vs. observación", Asociación Española de Ingeniería Sísmica - Department of Civil Engineering. The University of British Columbia Vancouver, BC, CANADÁ

Znidaric, J., Moses, F. Evaluation of the Carrying Capacity of Existing Bridges. Final Report. Institute for Testing and Research in Materials and Structures. Ljubljana, Slovenia: s.e.EDITORIAL, 1994.