

EVALUACIÓN POR CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL DE PUENTES EN ACERO APOYADA EN MONITOREO E INSTRUMENTACIÓN*

Edgar Eduardo Muñoz Díaz**

Federico Núñez***

Wilson Rodríguez Calderón****

Camilo Otálora Sánchez*****

Daniel Mauricio Ruiz Valencia*****

Resumen: en este artículo se presenta la evaluación por confiabilidad estructural de los elementos principales de uno de los puentes de acero más importantes de la red vial nacional de Colombia. La evaluación mediante técnicas de confiabilidad estructural se basó en el levantamiento geométrico, ensayos mecánicos, conteo del tráfico, prueba de carga, calibración de modelo estructural, instrumentación, monitoreo y simulación numérica. Para el monitoreo se empleó un esquema electrónico de medidores instalados sobre una red de datos multipunto *master-slave* (rs4-85), empleando la señal de diez galgas extensiométricas instaladas en los elementos principales del puente. A través del monitoreo se realizó una revisión de las solicitudes reales generadas por el tráfico en los elementos principales del puente comparadas con la

* Fecha de recepción: 10 de enero de 2006. Fecha de aceptación para publicación: 16 de marzo de 2006.

** Ingeniero Civil, Universidad de la Salle, M.Sc. en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: edgar.munoz@javeriana.edu.co

*** Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Joven investigador, Departamento de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo Electrónico: fnunez@javeriana.edu.co

**** Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, M.Sc. en Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Cataluña. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: wilroca@javeriana.edu.co

***** Ingeniero Electrónico, Pontificia Universidad Javeriana. Profesor Asistente, Departamento de Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: camilo.otalora@javeriana.edu.co

***** Ingeniero Civil y M.Sc. en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: daniel.ruiz@javeriana.edu.co

carga de diseño (C40-95) del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes. Se encontraron sobrecargas importantes sobre algunos elementos del puente, que afectan su seguridad y que deben ser objeto de control inmediato, además de algunas probabilidades de falla en algunos elementos que no están dentro del rango de seguridad para que garanticen la estabilidad y menor riesgo del puente.

Palabras clave: confiabilidad, monitoreo, simulación, puentes.

Abstract: this paper shows a reliability analysis evaluation of the main frames of one of the most important Colombian bridges. The evaluation was carried out by employing the following techniques: geometrical detailing, mechanical tests, traffic counting, load deformation tests, structural calibration of the bridge model, instrumentation, electrical monitoring and numerical simulation. The monitoring procedure was implemented by a series of electronic sensors connected to the main frame bridge structure in multiple locations to measure and record data from the strain gages sensors. The purpose for employing the monitoring procedure described above was to compile real-time data to compare them with the design load (C-40-95) established by the Colombian Seismic Code of Bridges Design. Overloads were found in some of the monitored frames. This fact compromises the bridge's safety and stability and must be controlled immediately. Additionally, probability failure calculations were carried out and the results were that the structure safety ranges that assure stability and a lower risk condition were not found.

Key words: reliability, monitoring, simulation, bridges.

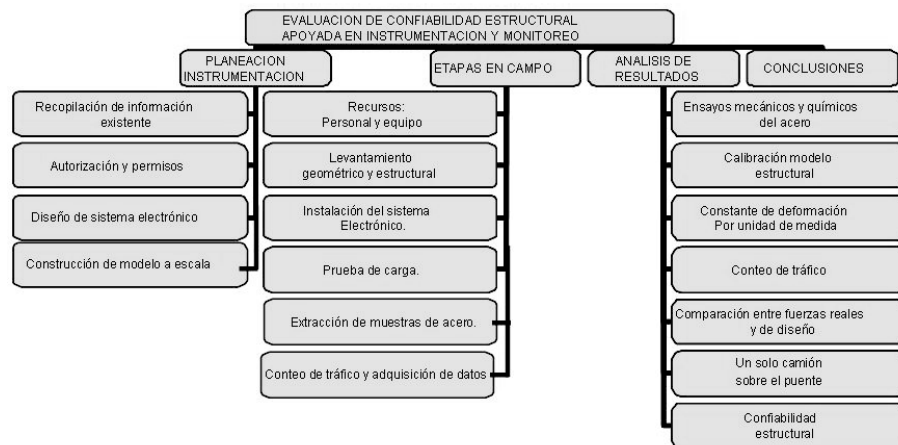
1. INTRODUCCIÓN

El Grupo de Investigación de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil está trabajando desde hace tres años en las técnicas de confiabilidad estructural, en sistemas de monitoreo e instrumentación y en estudios especializados de patología y durabilidad para la evaluación de puentes existentes [Muñoz, 2001], [Muñoz, Daza, Obregón, 2002], [Muñoz Prieto, Obregón, 2004], [Muñoz, Valbuena, Hernández, 2004], [Muñoz, et al, 2005]. Las primeras evaluaciones mediante las técnicas de confiabilidad estructural se realizaron mediante simulaciones de Montecarlo, basadas en la información existente sobre pesajes y conteos del tráfico suministrados por el Instituto Nacional de Vías (Invías). 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 flujograma con las etapas del proyecto, las cuales se explican a continuación:

Figura 1. Flujograma de las etapas del proyecto



Fuente: presentación propia de los autores.

2.1 PLANEACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

2.1.1 RECOPIACIÓN 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: conteos, TPDs, pesajes, configuración de los camiones, distancia entre ejes, entre otros.
- Planos de diseño, de construcción 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 o refuerzo

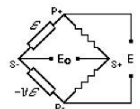
2.1.2 AUTORIZACIÓN Y PERMISOS

Se solicitó al Instituto Nacional de Vías (Invías) permiso y autorización para el monitoreo e instrumentación del puente Puerto Salgar.

2.1.3 DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA INSTRUMENTACIÓN

Para este proyecto se contó con la asesoría y el apoyo del Departamento de Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana para el diseño del sistema electrónico y su implementación en laboratorio y campo. 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 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. Para el cálculo de este valor se tiene en cuenta la configuración física de la instalación de las galgas extensiométricas, que consiste en dos sensores instalados a 90 grados (Figura 2), con uno de ellos alineado con el eje de la carga (ϵ) y el otro perpendicular a este ($-\nu \epsilon$). Para llevar a un punto común la información de la deformación medida en cada uno de los puntos se optó por un esquema de medidores instalados sobre una red de datos multipunto *master-slave* (rs4-85). En cada punto de medida se toma la señal de las galgas, que es amplificada, filtrada y digitalizada mediante un microcontrolador. Cada módulo de adquisición tiene una dirección de red asociada, de tal forma que puede ser interrogado por una unidad que actúa como árbitro de la red y solicita la información a cada uno de los medidores. La unidad que concentra los datos conforma una trama con la información de todos los puntos y la envía en formato ASCII por medio de un puerto serial RS-232 a un computador para almacenar la información. Se decidió usar este esquema para no depender de un programa especializado en el computador y poder almacenar los datos con un programa genérico de manejo del puerto serial que está incorporado en todos los sistemas operativos y no se constituye en un costo adicional. El voltaje de salida para esta configuración es:

Figura 2. Circuito electrónico



$$\frac{E_e}{E} = \frac{F \epsilon (1 + \nu) \times 10^{-3}}{4 + 2 F \epsilon (1 - \nu) \times 10^{-6}} \text{ mV/V} \quad (1)$$

Fuente: los autores.

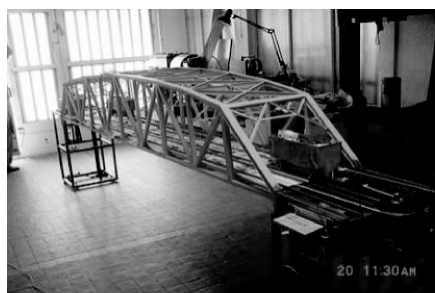
En donde ν es el coeficiente de Poisson del material, ϵ el *strain* aplicado y F el factor de la galga extensiométrica (2.11, dado por el fabricante). El voltaje diferencial E_o es amplificado por 800 y digitalizado en 10 bits (1.024 niveles) con un voltaje de referencia de 5.000 voltios. Con estos datos se obtiene que por unidad de medida se tenga una constante de $177 \mu\epsilon$.

2.1.4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A ESCALA Y PERFIL DE MEDICIÓN

Para la organización y planeación de las labores de campo y el monitoreo del puente Puerto Salgar, se realizó la construcción de su modelo a escala 1:25 (Figura 3), con el fin de plantear diferentes alternativas

de localización óptima de los equipos electrónicos en el puente, determinar la extensión y localización de los cables de comunicación entre ellos, así como la localización del centro de operaciones para la toma de datos, de los puntos en el puente para las labores de topografía en el momento de la prueba de carga, de los camiones para la prueba de carga y efectuar las pruebas de instalación y calibración de las galgas extensiométricas en el modelo (Figura 3 y Figura 4).

Figura 3. Modelo a escala 1:25 del puente Salgar. Figura 4. Galgas extensiométricas sobre platinas



Fuente: presentación propia de los autores.

3. ETAPAS EN CAMPO

3.1 PERSONAL Y EQUIPO

El personal en campo constó del ingeniero jefe del proyecto, dos ingenieros coordinadores en campo, un ingeniero electrónico asesor, un ingeniero metalúrgico y dos auxiliares de campo para la instalación. Para la instrumentación se emplearon los siguientes equipos y componentes: cables de comunicación RS485 para comunicación multipunto, diez galgas extensiométricas y sus pegantes especiales, transformadores y reguladores de voltaje, diez platinas de acero de $\frac{1}{2}$ " de espesor para anclaje y un equipo de soldadura para instalación de las diez 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 las cargas de las volquetas vacías y llenas para la prueba de carga.

3.2 LEVANTAMIENTO GEOMÉTRICO Y ESTRUCTURAL

El puente consta de dos calzadas para paso vehicular y una para paso del tren. Se trata de una estructura mixta de acero y concreto, compuesta por cuatro naves iguales y una rampa curva de acceso con 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 en el sentido Honda-Puerto Boyacá. Se trata de 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 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 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 et al., 2005] donde se realizó la evaluación por confiabilidad estructural desde el punto de vista 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 las correspondientes galgas extensiométricas.
- Conexión con el cable para conformar el sistema multipunto.
- Pruebas en la instalación de cada punto de la toma de datos.
- Protección con aluminio de cada uno de los puntos (platinas, galgas y circuitos).

3.4 PRUEBA DE CARGA

Se contrataron cuatro volquetas a las cuales se les realizó el pesaje vacío y cargadas mediante el uso del equipo y de la báscula de la zona. Además se les realizó a las volquetas la medición de su geometría detallada (distancia entre ejes, peso entre ejes, etc.). Las 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 era la calibración del modelo estructural de la nave del puente Puerto Salgar bajo tres condiciones de frontera: la posición e intensidad de cargas, la deformación vertical que generan en las diferentes posiciones mediante las mediciones de topografía y la medición de los deltas de voltaje con las galgas.

Para tal fin se diseñaron y probaron en campo tres hipótesis para la prueba de carga (Figura 5). Inicialmente se probó el puente sin cargas con el objeto de evaluar el nivel cero. Mediante equipos de topografía se tomó la deformación vertical en los once puntos del cordón inferior de la armadura aguas arriba para cada una de las hipótesis de carga mostradas.

Figura 5. Condiciones de carga del puente



a) Primera condición

b) Segunda condición

c) Tercera condición

Fuente: presentación propia de los autores.

3.5 EXTRACCIÓN DE MUESTRAS DE ACERO DEL PUENTE

Mediante el uso de un equipo de oxicorte se extrajeron seis muestras de acero de algunos elementos secundarios del puente, asegurando que no generaran ninguna deficiencia estructural. Estas platinas recuperadas tienen una sección de 25 cm. x 40 cm., para que cumplan con las especificaciones de ensayos mecánicos de la norma ASTM E34. Estas platinas fueron enviadas al laboratorio de la Siderúrgica Paz de Río para los respectivos ensayos.

3.6 CONTEO DE TRÁFICO Y ADQUISICIÓN DE DATOS

Esta etapa consistió en el conteo de tráfico que circulaba durante las mismas horas en las que se estaba realizando 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 permiten 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. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 ENSAYOS MECÁNICOS DEL ACERO

La información de ensayos mecánicos, químicos y de metalografía de las platinas, además de servir como datos esenciales para la calibración del modelo y evaluar las curvas de probabilidad de resistencia de los elementos en estudio, es útil para futuros trabajos de investigación, tales como el estudio del fenómeno de la fatiga y de sistemas de refuerzo de rehabilitación de los componentes del puente.

4.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL

Se calibró el modelo estructural del puente basado en los resultados de las pruebas 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 modelos estructurales, uno de ellos en el programa de análisis estructural SAP-2000 y otro en el programa MEF ANSYS mediante algoritmos de optimización para la correspondiente calibración.

4.2.1 MODELO ESTRUCTURAL EN SAP-2000

Se complementó y mejoró el modelo estructural desarrollado en SAP-2000 en el año 2002 [Daza, Salazar, 2002] basados en el levantamiento estructural detallado y las propiedades mecánicas determinadas (Figura 6). El modelo estructural desarrollado en SAP-2000 consta de 220 nudos, 2.754 elementos finitos discretos y 6.840 elementos finitos continuos. 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 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. Después de diferentes pruebas y ajustes se logró un promedio de calibración del 90,3%, lo que representa un 9,7% de diferencia entre los datos medidos en campo y las estimaciones analíticas.

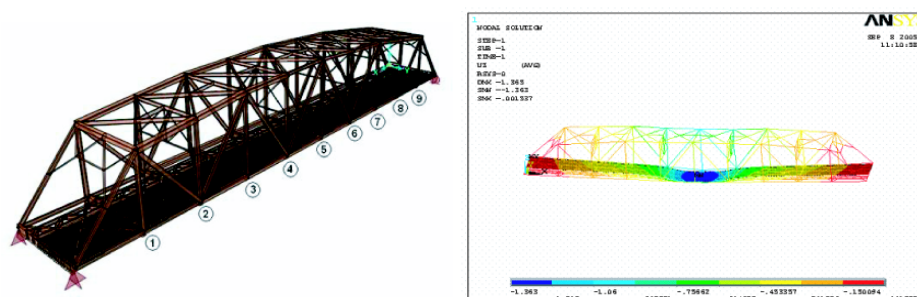
4.2.2 MODELO ESTRUCTURAL EN MEF ANSYS

Se realizó la calibración del modelo empleando técnicas de optimización en el programa de elementos finitos MEF ANSYS. Se siguieron las siguientes etapas: definición de función objetivo, definición de variables de diseño y definición de variables de estado. A partir de ello, se concluyó que el modelo estructural debe tener una altura de la losa de 18,86 cm., y un módulo de elasticidad de 2182874,86 Kgf/cm². En la Figura 6 se muestran 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 como resultado de los programas SAP-2000 y ANSYS se presentan en la Figura 7.

4.3 DESCRIPCIÓN Y CONTEO DEL TRÁFICO

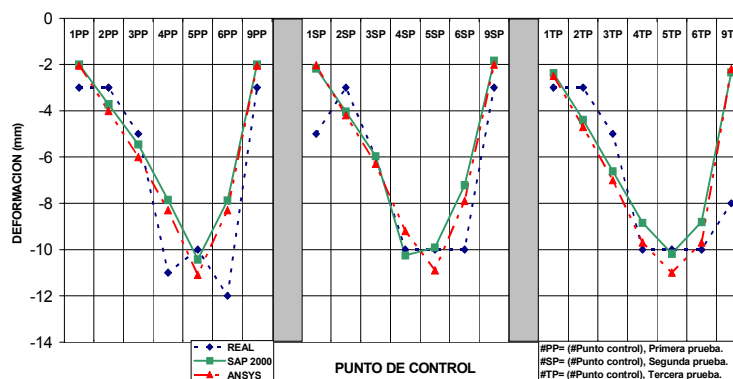
Se encontró que el camión que más ocurrencia tiene sobre el puente es el C2, con un 58% en el sentido La Dorada-Puerto Salgar y un 55% en el sentido Puerto Salgar-La Dorada. Este camión tiene solamente un efecto local sobre los componentes del puente como la losa en

Figura 6. Modelo en SAP-2000 y ANSYS del puente Puerto Salgar



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 7. Comparación entre deformación vertical de campo y analítica



Fuente: presentación propia de los autores.

concreto reforzado o las vigas longitudinales y transversales presentes en el tablero. Los camiones C3S3 y C3S2, que tienen un mayor efecto sobre el puente, tienen una ocurrencia de 20% y 14% en el sentido La Dorada-Puerto Salgar, respectivamente, mientras 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 éste 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 los vehículos 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 y ocasionan atascos de tráfico.

4.4 COMPARACIÓN ENTRE FUERZAS INTERNAS REALES Y LAS DE DISEÑO

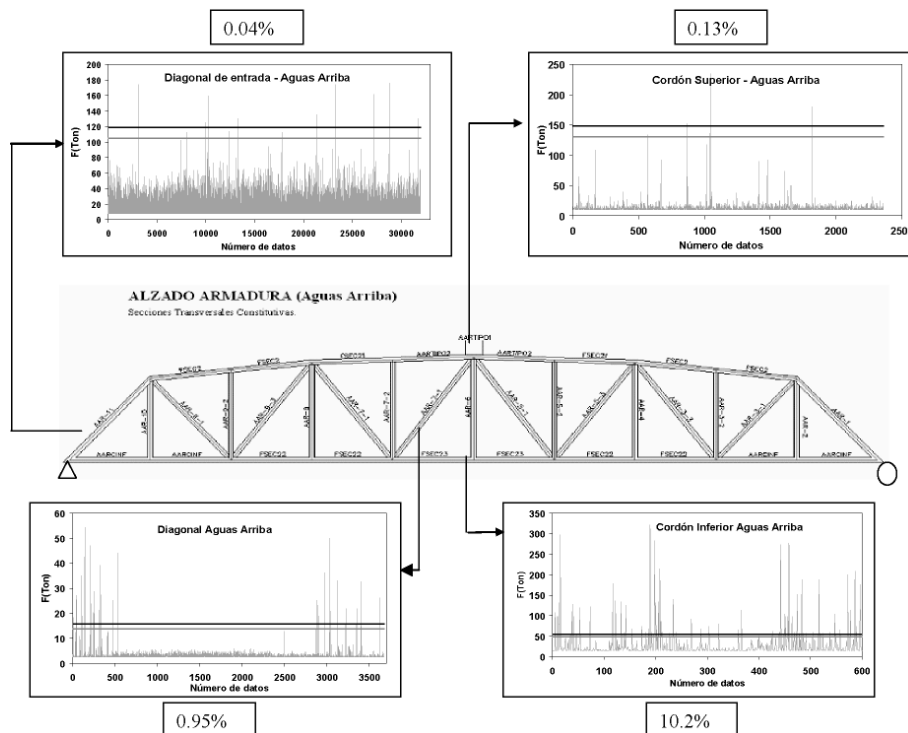
4.4.1 CARGA DE DISEÑO

El Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP) especifica como camión de diseño para Colombia el C40-95.

4.4.2 EFECTOS SOBRE LOS ELEMENTOS DE LA ARMADURA AGUAS ARRIBA

Se exponen a continuación los registros de fuerzas internas de los cuatro elementos seleccionados de la armadura aguas arriba (Figura 8), comparadas con la carga de diseño o de revisión (C40-95) de puentes establecida por el CCDSP. A partir de 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 de forma suficiente los efectos que producen los camiones reales en la red vial nacional. En los demás elementos de esta armadura se identificó un sobrepeso con respecto a la carga de diseño, aunque en menor proporción.

Figura 8. Picos máximos registrados en los elementos monitoreados aguas arriba



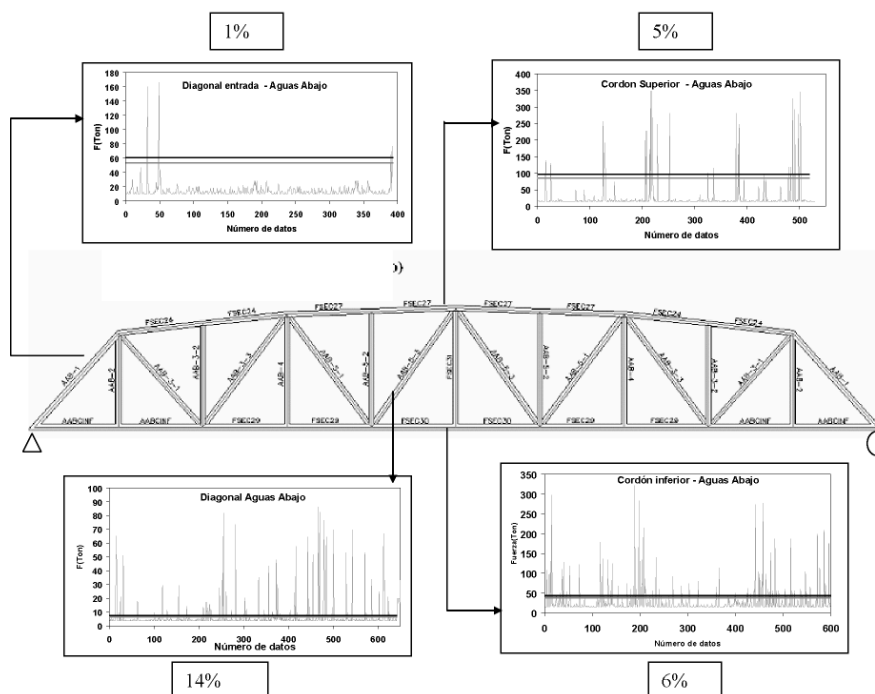
Fuente: presentación propia de los autores.

En la Tabla 1 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 observan diferencias importantes que comprueban la necesidad de la revisión del camión C-4095, utilizado normalmente para el diseño de puentes nuevos y la revisión de los existentes.

4.4.3 EFECTOS SOBRE LOS ELEMENTOS DE LA ARMADURA AGUAS ABAJO

Al igual que en el caso anterior, se exponen los registros de fuerzas internas de los cuatro elementos seleccionados de la armadura aguas abajo (Figura 9), incluyendo la correspondiente carga de diseño máxima. Allí se resumen los resultados de la comparación de las cargas reales con las de diseño y se encuentra que la diagonal tiene un 14% de fuerzas internas mayores a las de diseño. En los demás elementos de esta armadura aguas arriba se sobrepasa en una proporción del 1% al 6% su fuerza real interna con respecto a la carga de diseño (Tabla 2). Allí se presenta la relación entre las cargas vivas reales (máxima, media y mínima), obtenidas de la instrumentación, y la carga de diseño y la máxima de resistencia. Se observan diferencias importantes que justifican la revisión urgente del camión de diseño C-40-95.

Figura 9. Picos máximos registrados en los elementos monitoreados aguas abajo*



Fuente: presentación propia de los autores.

* El valor en el recuadro establece el porcentaje total de eventos que sobrepasaron los diales de carga máxima (gris) y de carga máxima con impacto (negro).

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 mínimo real (ton)	Carga viva máximo de diseño (ton)	% Número de cargas mayores a las de diseño
Cordón superior	2361	3	258	21,2	12	148	0,13%
Cordón inferior	618	63	321	17,7	11	55	10.19%
Diagonal de entrada	38358	17	176	13,9	8	119	0,04%
Diagonal	3678	35	54	6,1	2	16	0,95%

Fuente: los autores.

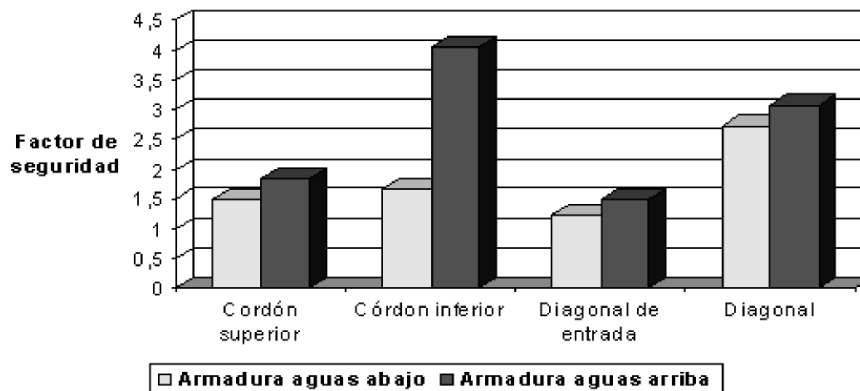
Tabla 2. Comparación entre las cargas reales de carga viva y las de diseño de los elementos de la armadura aguas abajo

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 mínimo real (ton)	Carga viva máximo de diseño (ton)	% Número de cargas mayores a las de diseño
Cordón superior	529	29	349	13,0	15	97	5%
Cordón inferior	1140	67	257	25,8	13	43	6%
Diagonal de entrada	396	4	166	15,2	10	61	1%
Diagonal	653	94	86	7,5	4	7	14%

Fuente: los autores.

En la Figura 10 se presentan los factores de seguridad de los elementos de las armaduras, los cuales son mayores a 1 y 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 y puede modificar este resultado.

Figura 10. Factores de seguridad de los elementos de las armaduras del puente

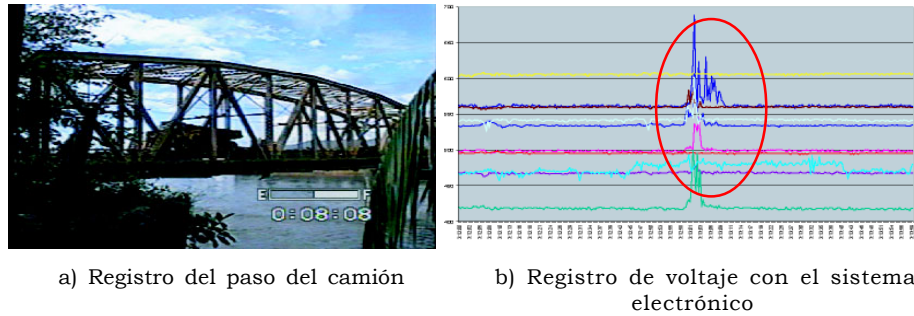


Fuente: presentación propia de los autores.

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 y poder determinar indirectamente su carga total y compararla con su carga límite legal. Para esto se empleó lo establecido en el Artículo 9 de la Resolución 004100 de 2004 del Ministerio de Transporte, que 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 registros obtenidos durante el proceso de monitoreo. En la Figura 11 se presenta uno de los casos de comparación aproximada entre las fuerzas admisibles legales y las que realmente genera un solo camión. En este ejercicio, en general, se encontró un sobrepeso promedio del 15%. Se observa 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 11. Ejercicio completo de monitoreo de un solo camión



Fuente: presentación propia de los autores.

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 que tienda 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 el valor inverso de la función normal estándar acumulativa de la probabilidad de falla (P_f).

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f) \quad (2)$$

La proporcionalidad inversa que existe entre β y P_f en la ecuación (2) indica una buena seguridad de la estructura. Para evidenciar este hecho se utilizan las técnicas de confiabilidad consistentes en verificar la probabilidad entre las curvas de la resistencia, R , y de la solicitación, S , en la Ecuación (3). 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 solicitación, éstas son tomadas como variables aleatorias con su correspondiente distribución de probabilidad. Para el caso de las variables aleatorias distribuidas R y S , se asumen funciones de probabilidad de distribución, así como la no existencia de correlación entre ellas. El margen de seguridad se puede expresar entonces 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, ésta adopta 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 : medias de la distribución de la resistencia y de las solicitaciones

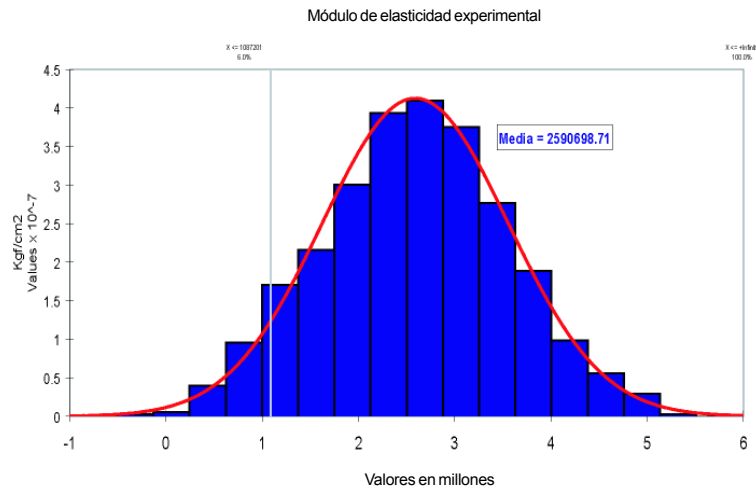
s_R, s_S : desviaciones estándar de la distribución de la resistencia y las solicitaciones

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 (basado en el documento *Traffic loads Loads on bridges Bridges*, número 1, volumen 3), según el cual la probabilidad de falla se encuentra en el rango $10^{-4} \leq Pf \leq 10^{-6}$. De esta manera, se dedujeron los límites del índice de confiabilidad que varían entre $3,5 \leq \beta \leq 4,5$. Para el análisis por confiabilidad estructural se seleccionaron las curvas de distribución de probabilidad que mejor se ajustaran a las funciones de resistencia y solicitación. Mediante la ecuación (5) se determinó el índice de confiabilidad β , el cual se puede utilizar aun para funciones de distribución de probabilidad diferentes a la normal con resultados satisfactorios [Mays, Tung, 1992], [Ang, 1973]. Se considera que este es un procedimiento aproximado con un error mínimo y aceptable. Sin embargo, esta consideración se comprobó analíticamente para algunos de los casos de evaluación de índices de falla mediante la integración numérica y la determinación de la curva resultante G. Así, 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, es decir, la zona en la que la curva de solicitación supera a la de resistencia. 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 , como el valor inverso del coeficiente de variación del margen de seguridad. Para el análisis por confiabilidad estructural se seleccionaron las curvas de distribución de probabilidad que mejor se ajustan a las funciones de resistencia y solicitación, empleando la técnica de bondad del ajuste para la curva de distribución de probabilidad acumulada de Kolgomorov-Smirnov.

4.6.1 RESISTENCIA

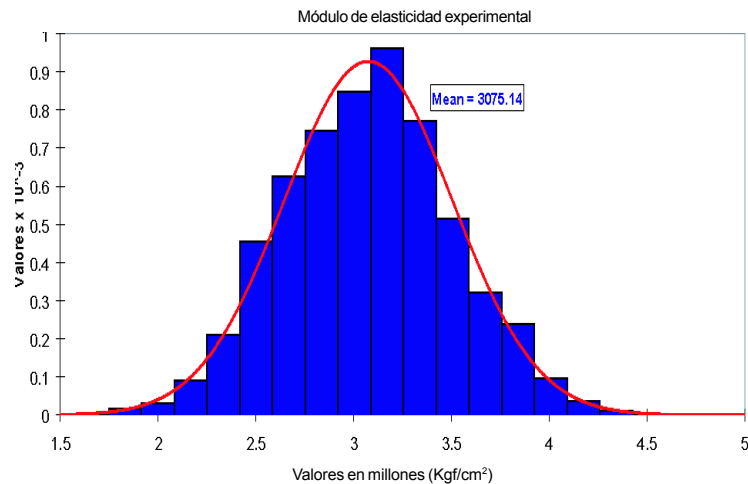
Se evaluaron las curvas de probabilidad de resistencia de cada uno de los elementos de las armaduras que se seleccionaron para monitorear e instrumentar. Con el objeto de tener mayor información estadística del módulo de elasticidad, E, y el límite de fluencia, f_y , fue necesario generar valores aleatorios ajustados a una función normal usando el método de los números aleatorios (Figura 12 y Figura 13).

Figura 12. Ajuste de datos simulados de módulo de elasticidad



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 13. Ajuste de datos simulados de esfuerzo de fluencia



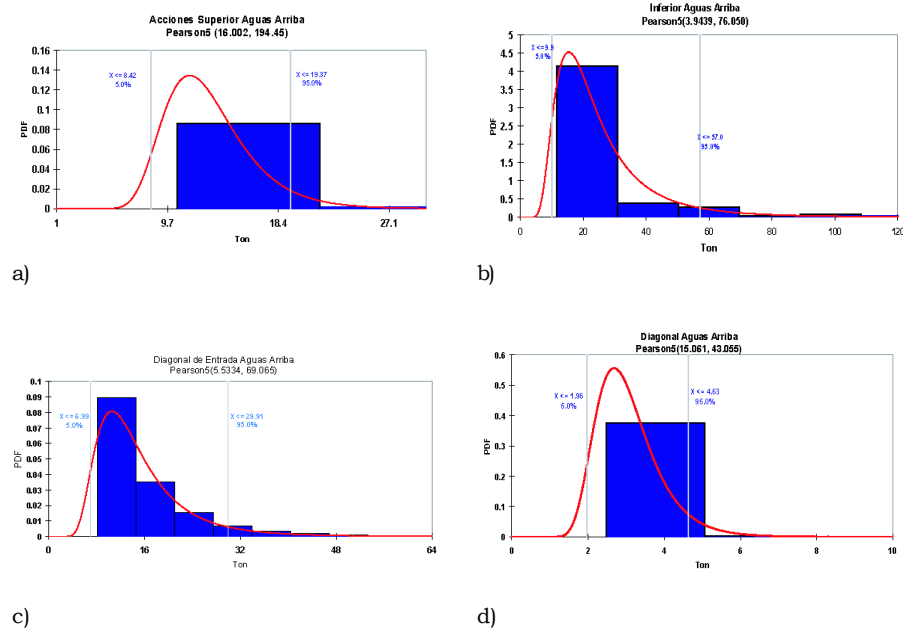
Fuente: presentación propia de los autores.

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 Sismico de Puentes.

4.6.2 SOLICITACIÓN

Se realizaron las curvas de probabilidad de solicitación de los ocho elementos instrumentados de las armaduras aguas abajo y arriba. En la Figura 14 se presentan los cuatro elementos de la armadura aguas arriba.

Figura 14. Curvas de probabilidad de la solicitación de los diferentes elementos de la armadura del puente aguas arriba: a) cordón superior; b) cordón inferior; c) diagonal de entrada; d) diagonal-armadura



Fuente: presentación propia de los autores.

4.6.3 ÍNDICES DE CONFIABILIDAD

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

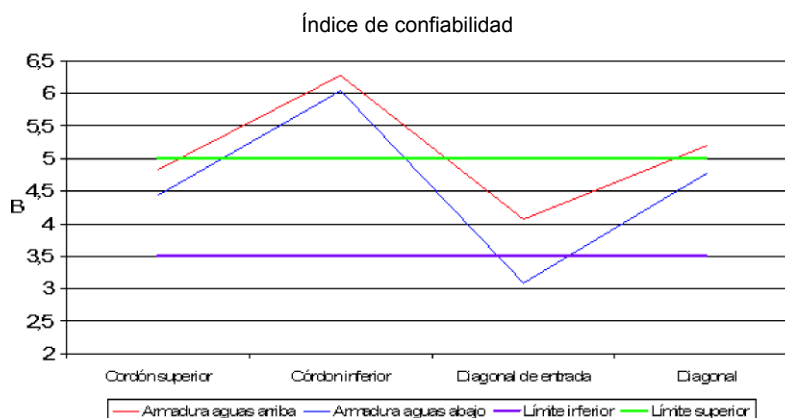
Tabla 3. Índice de falla de los elementos da la armadura aguas arriba

	Tipo de elemento	Datos de la instrumentación			Evaluación de resistencia (ensayos)			Índice de falla
		Tipo de curva ajustada	Carga muerta adicional	Carga total	Desviación estandar	Tipo de curva ajustada	Carga media del ajuste	
Aguas abajo	Cordón superior	Pearson5	254,10894	275,323	12,341	Log Logística	1070,60	4,83
	Cordón inferior	Pearson5	133,59993	151,272	8,223	Beta	1254,5	6,28
	Diagonal de entrada	Pearson5	173,51495	187,429	4,918	Log Logística	513,73	4,06
	Diagonal	Pearson5	8,52451	14,630	4,284	Log Logística	263,47	5,19
	Cordón superior	Pearson5	252,73602	265,698	3,464	Log Logística	783,85	4,44
Aguas arriba	Cordón inferior	Pearson5	82,78012	108,613	18,529	Beta	762,37	6,04
	Diagonal de entrada	Pearson5	194,56114	209,796	8,105	Log Logística	412,26	3,09
	Diagonal	Pearson5	7,71561	10,610	0,681	Log Logística	149,68	4,77

Fuente: presentación propia de los autores.

En la Figura 15 se presentan los índices de confiabilidad para cada elemento y en la Tabla 4 las probabilidades de falla correspondientes. Con base en 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 0,00097. Esto indica que el elemento no se encuentra en el rango de seguridad recomendado por EUROCODE.

Figura 15. Índices de confiabilidad de los elementos de las armaduras del puente



Fuente: presentación propia de los autores.

Sin embargo, esta probabilidad de falla no incluye el efecto del tren, que en caso de que se presente sería mayor y, por lo tanto, aumentaría el riesgo de falla. Este elemento involucra una moderada preocupación de riesgo, por lo cual se requiere de medidas de prevención a mediano plazo. El resto de los elementos se encuentra con índices de confiabilidad entre 4,4 y 6,3, con lo cual cumplen con las recomendaciones de seguridad del EUROCODE, lo que significa un riesgo mínimo e improbable sin tener en cuenta el efecto del tren.

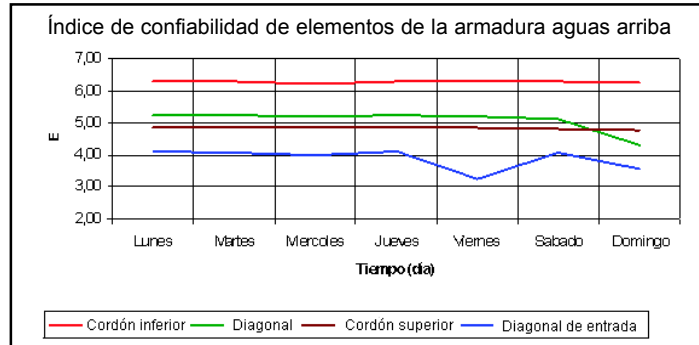
Tabla 4. Probabilidades de falla de cada elemento de cada armadura

Tipos de elementos	Índice de confiabilidad	Probabilidad de falla
Armadura aguas arriba		
Cordón superior	4,8	Entre 1.3E-6 y 2.8E-7
Cordón 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
Cordón inferior	6,0	9,86E-10
Diagonal de entrada	3,1	0,00097
Diagonal	4,8	Entre 1.3E-6 y 2.8E-7

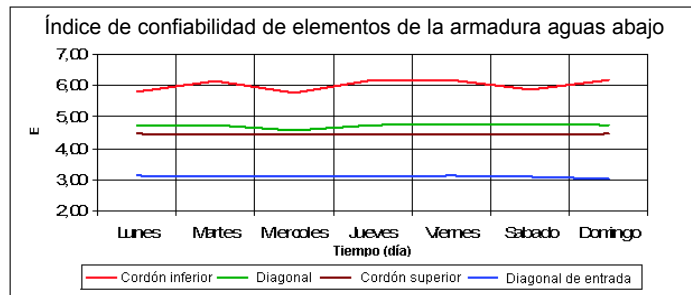
Fuente: presentación propia de los autores.

Los índices de confiabilidad de cada uno de los elementos se evaluaron en función del tiempo de monitoreo e instrumentación (Figura 16). En términos generales se observa que la probabilidad de falla es constante; sin embargo, se aprecia un cambio los días viernes y sábado, cuando aumenta el tráfico, y por lo tanto disminuye el índice de confiabilidad y aumenta la probabilidad de falla.

Figura 16. Índices de confiabilidad de los elementos armadura aguas arriba (a) y aguas abajo (b)



a)



b)

Fuente: presentación propia de los autores.

4.6.4. COMPARACIÓN DE CONFIABILIDAD BASADA EN DATOS EXPERIMENTALES Y ANALÍTICOS

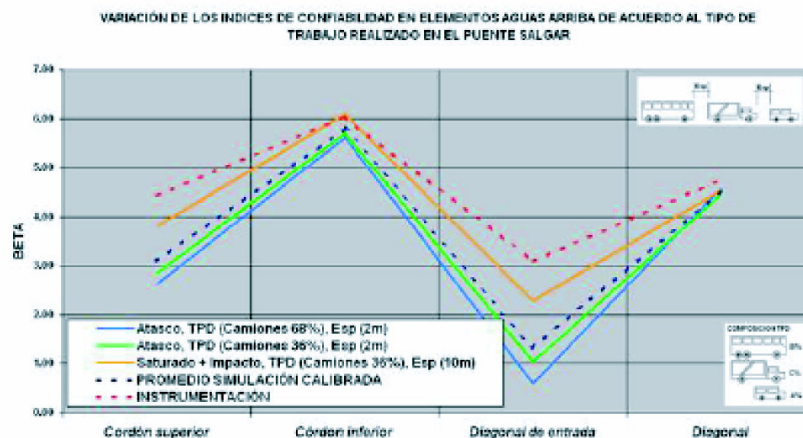
En Muñoz et al. [2005] se realizó el análisis de confiabilidad de este puente solamente a partir de la información suministrada por el Invias y empresas consultoras sin incluir instrumentación del puente, ni toma de muestras de los materiales para sus respectivos ensayos. Dichos resultados coincidieron con los de este nuevo trabajo en algunos aspectos. Esto es 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. Al comparar los resultados de los dos proyectos, se justifica ampliamente este tipo de análisis basado en el estudio detallado de los materiales,

del monitoreo y de la instrumentación para obtener resultados mucho más confiables.

En consecuencia, 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 encontradas son menores, como se observa en la Figura 17, 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 solicitación y de resistencia.

Este procedimiento es un instrumento adicional para la toma de decisiones, con el cual se pueden hacer análisis de confiabilidad mediante simulación numérica, incluyendo la proyección del tráfico y el cálculo de los índices de confiabilidad a corto, mediano y largo plazo.

Figura 17. Comparación entre los resultados del monitoreo y la simulación del modelo calibrado



Fuente: presentación propia de los autores.

5. CONCLUSIONES

El método planteado mediante técnicas de confiabilidad estructural apoyada en monitoreo e instrumentación es una alternativa preventiva con una gran ventaja sobre el tradicional método determinístico contenido en el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, que se viene aplicando inadecuadamente para evaluar la capacidad de carga de los puentes existentes.

A partir de los datos de monitoreo y de los análisis de confiabilidad efectuados se encontró:

- 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 0,05% a un 6%. Es importante aclarar que se obtuvieron estos resultados al realizar comparaciones entre solicitaciones 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 no representa en forma suficiente el efecto producido por los camiones reales que transitan por el puente.
- Esta sobrecarga es una de las causas principales de los daños y del 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 representa un alto riesgo y que pone en entredicho la seguridad del puente. Se encontró, en forma aproximada, un sobrepeso promedio del 15%, al evaluar los ocho elementos monitoreados del puente.
- 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. Se trata de un elemento principal del puente que tiene una seguridad inadecuada y que no se encuentra dentro del rango de seguridad que recomienda el EUROCODE. Sin embargo, esta probabilidad de falla no incluye el efecto del tren, que en caso de circular sobre el puente aumentaría el riesgo sobre la estructura. Este 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.
- Los demás elementos de las armaduras tienen índices de confiabilidad entre 4,4 y 6,3, con lo cual cumplen con las recomendaciones de seguridad del EUROCODE, lo que representa un riesgo mínimo y de ocurrencia improbable sin tener en cuenta el efecto del tren.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda incrementar por parte del Inviás 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, pues se trata de 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 en algunos casos generan fuerzas internas menores comparadas con las reales.
- Es indispensable desarrollar una norma para la evaluación de capacidad de carga de puentes existentes en el país, para lo cual resultan de utilidad las investigaciones realizadas por el grupo de investigación al cual pertenecen los autores.
- Se evidencia la necesidad de que el Invías emprenda labores de monitoreo e instrumentación de los principales puentes existentes del país, así como que se prevea la instrumentación de los puentes que en adelante se construyan.
- Para trabajos futuros 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.

REFERENCIAS

- Ang, A.H.-S. "Structural Risk Analysis and Reliability-Based Design". En: *Journal of Structural Engineering Division*, 99, 1973, 20-35.
- Colombia. Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Asociación Colombiana de Ingeniera Sísmica. *Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes*. Bogotá: Invías, 1995.
- Daza, R.D., Salazar, F. *Metodología de evaluación de puentes metálicos*. Trabajo de grado para obtener título de Ingeniero Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2001.
- Mays, L., Tung, Y. *Hydrosystems Engineering and Management*. McGraw Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. New York: Mc Graw Hill, 1992.
- Muñoz, E.E. "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., Obregón, N. "Metodología de evaluación estructural de puentes metálicos por técnicas de fiabilidad estructural". En: *Ingeniería de Construcción*, 17 (1), 2002, 44-52.
- Muñoz, E.E., Prieto, J.A., Obregón, N. "Evaluación de puentes existentes mediante confiabilidad parcial. Aplicación para un puente en concreto preesforzado". En: *Ingeniería de Construcción*, 18 (3), 2004, 157-163.
- Muñoz, E.E., Valbuena, E.A., Hernández, R. "Estado y daños típicos de los puentes de la red vial nacional, basados en inspecciones principales". En: *Rutas*, 104, 2004, 29-41.
- Muñoz, E.E., Valbuena, E.A. "Evaluación de un puente en acero mediante criterios de confiabilidad parcial". En: *Rutas*, 110, 2005, 49-60.
- Muñoz, E.E., Núñez, F., Rodríguez, W., Otálora, C., Ruiz, D. *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. *Reliability of Structures*. Mc Graw Hill Civil Engineering Series. New York: Mc Graw Hill, 2000.
- Sobrino, J.A., 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. “¿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., 1998.
- Tanner, P., Sobrino, J. A. “Acciones en puentes”. En: *Curso de Estudios Mayores de la Construcción. Fiabilidad Estructural. Tratamiento de las Acciones Especiales*. Barcelona: s.e., 1998.
- 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., 1994.