

Problemática en la inspección de puentes metálicos antiguos

Problems in the inspection of old metal bridges

Ismael Carpintero García

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, CEDEX-Laboratorio Central, Coordinador de Programa, Madrid, España

Recibido el 3 de abril de 2017; aceptado el 29 de abril de 2017

Disponible en Internet el 17 de junio de 2017

Resumen

La inspección de puentes metálicos antiguos tiene como uno de sus objetivos principales identificar los posibles riesgos de que se produzcan fallos frágiles que puedan resultar catastróficos. Son diversos los factores que influyen en este problema: la baja tenacidad que en ocasiones tienen los materiales metálicos con los que fueron construidos; el incremento de las cargas que soportan (tanto permanentes como vivas); la posibilidad de desarrollar fisuras por fatiga habida cuenta de que los detalles de sus uniones se diseñaron cuando aún no se conocía este problema; el desarrollo de la corrosión, que debilita secciones resistentes y puede producir concentraciones de tensiones, etc.

Se presentan una serie de puentes en los cuales esta problemática se ha puesto de manifiesto de distinta manera. Finalmente se propone a partir de su análisis un conjunto de actuaciones complementarias que pueden desarrollarse sin grandes incrementos de coste, facilitando la estima del riesgo de la estructura a desarrollar este tipo de fallos.

© 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Puentes metálicos; Inspección; Fisuras; Fallos frágiles

Abstract

One of the main objectives in the inspection of old metal bridges is to identify the risk of brittle crack failures. There are many factors involved in this problem: the usual low toughness in old metal structures, the increased loads supported by the old bridges (permanent and also live loads); the possibility of fatigue fissures appearing, taking into account that their connection details were designed when this problem was unknown; development of corrosion, which could weaken sections, create tensile concentrations, etc.

Some bridges with those problems are then analysed. Finally, from this analysis, some complementary actions are proposed that would lead to a better risk assessment of these bridge structures without a great increase in costs.

© 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: Metal bridges; Inspection; Cracks; Brittle failure

1. Introducción

A las dificultades propias de la inspección de puentes, como son la falta de información previa sobre la estructura, la limitación de los recursos disponibles (no solo económicos, sino también de disponibilidad de personal especializado) y la dificultad de acceso a las zonas a inspeccionar (más difícil aún en

general en el caso de los puentes de ferrocarril), se añade en el caso de los puentes metálicos que algunos de los mecanismos de daño que se quieren controlar pueden ser fácilmente no detectados en una inspección visual.

En particular, este es el caso de las fisuras y fracturas, daños que frecuentemente son de difícil detección visual al tener aberturas reducidas y quedar ocultos por la corrosión, los rigidizadores y las chapas de las uniones, etc. Además, las aludidas dificultades de acceso hacen que queden muchos ángulos de visión de la estructura no accesibles a inspección.

Correo electrónico: ismael.carpintero@cedex.es

<https://doi.org/10.1016/j.hya.2017.04.020>

0439-5689/© 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Imam y Chryssanthopoulos [1] estudiaron 164 casos de fallos en puentes metálicos, de los cuales aproximadamente la mitad habían colapsado. La mayor parte de estos colapsos se debían a fenómenos naturales, errores de diseño, accidentes o errores humanos. No menos del 25% de los colapsos se produjeron por fenómenos que inducen tipos de daños habitualmente detectables en inspecciones (tales como deformaciones excesivas o pandeo de elementos por insuficiente capacidad mecánica, corrosión, fatiga, o roturas frágiles de elementos). En un 22% de los colapsos el fallo se produjo por el desarrollo de fisuras o la aparición de fracturas (daños de más difícil detección mediante inspección visual).

En el caso de puentes metálicos no colapsados, pero que a raíz de su inspección o estudio se adoptaron medidas que condicionaron su funcionalidad o exigieron su reparación o refuerzo, más del 70% de los casos se produjeron por la aparición de fracturas o el desarrollo de fisuras de fatiga de distinta naturaleza.



Figura 1. Acumulación de suciedad en el interior de un cajón de un puente ferroviario.

2. Características principales de los puentes metálicos antiguos

A efectos de su inspección y desarrollo de daños, entre otros aspectos los puentes metálicos antiguos se caracterizan por:

- Habitualmente se han resuelto con vanos isostáticos a flexión. Frente a esfuerzos cortantes los puentes de celosía suelen tener una gran redundancia, sobre todo en el caso de los puentes de ferrocarril, ya que por su ligereza normalmente son muy sensibles frente a la posición de la carga. Por esto mismo los puentes de celosía pueden resultar muy robustos frente al fallo potencial de sus diagonales. Sin embargo, frente a flexión suelen contar con pocos planos resistentes (muchas veces solo dos), de manera que son muy sensibles ante el fallo de alguno de sus cordones longitudinales.
- Como se ha indicado antes, la difícil accesibilidad hace que, salvo que se cuente con medios especiales, muchos ángulos de visión queden ocultos. La corrosión y la suciedad que se acumula en las «trampas de agua» encubren igualmente muchas zonas (fig. 1).
- Esa misma circunstancia de presencia de óxido y suciedad acumulada, junto con la falta de un mantenimiento adecuado, hace que en muchos casos los aparatos de apoyo se encuentren en la práctica bloqueados, añadiéndose tensiones no previstas a la estructura ante las deformaciones impuestas por variaciones de temperatura o las cargas solicitantes (fig. 2).
- Existe una importante heterogeneidad en cuanto a los materiales utilizados en la construcción metálica a lo largo del tiempo (hierro fundido, aceros forjados, hierros pudelados, aceros laminados, etc.), con distintas características mecánicas, en particular en cuanto a su tenacidad.



Figura 2. Apoyo deslizante del mismo puente.

3. Ejemplos de puentes metálicos con aceros potencialmente susceptibles de desarrollar fallos frágiles

3.1. Puente de la carretera I-35W en Minneapolis

Este puente de carretera sobre el río Mississippi fue construido entre 1964 y 1967, con perfiles armados soldados y uniones roblonadas y atornilladas. El tramo principal sobre el río se resolvió con tres vanos de dos celosías de canto variable (fig. 3). En 1977 y 1998 fue sometido a sendas remodelaciones que incrementaron su carga permanente.



Figura 3. Vista del tramo principal del puente antes de su colapso.



Figura 5. Vista del tablero metálico.

El 1 de agosto de 2007 se produjo su colapso de manera brusca (fig. 4), a pesar de que se trataba de un puente que estaba marcado como sensible por tener un acero poco tenaz, haberse identificado numerosas fisuras por fatiga en los vanos de aproximación de ambas márgenes, y contar con una reducida robustez a flexión en el tramo principal.

De hecho, en 2001 se hizo un estudio de fatiga [2] en el que se identificaron en el tramo principal unas barras del entramado como los elementos que más probablemente podían desarrollar fisuras por fatiga, sobre las que se recomendaba intensificar su control, si bien se indicaba que, conforme al análisis realizado, no era esperable que se produjesen ese tipo de daños.

Las causas del colapso no pudieron ser determinadas, aunque estudios posteriores al siniestro identificaron unas cartelas de unión de espesor netamente inferior al exigible para las cargas reales que solicitaban el puente, y cuyo fallo podía justificar el hundimiento [3].

En los estudios previos de la estructura que se realizaron cada vez que se incrementó la carga permanente en el puente, estas cartelas no se habían analizado dado que se dio por hecho que la capacidad mecánica de los nudos era superior a la de los elementos que concurrían en ellos. Tampoco en las numerosas inspecciones del puente se había detectado fisura alguna en la estructura del tramo principal del puente [4].

3.2. Puente de carretera en Zamora

Se trata de un puente formado por cuatro tramos, el primero de los cuales, de los siglos XIX-XX, tiene una longitud total de 74 m y está resuelto con cinco vanos isostáticos metálicos (cada uno con dos vigas principales de celosía con montantes, y diagonales dobles en Cruz de San Andrés).

Todos los elementos de las celosías están resueltos con secciones armadas mediante chapas y perfiles angulares, con uniones roblonadas (fig. 5). El puente actualmente solo presta servicio al tráfico local, de carácter eminentemente agropecuario. En la inspección de este tramo del puente no se detectaron daños significativos. Se realizó una serie de ensayos para caracterizar el material metálico, de los que se dedujo que se trataba de un acero al carbono no aleado en estado recocido, cuyas prestaciones mecánicas frente a la rotura dúctil eran las habituales para los aceros de la época. Sí se podía destacar que en el ensayo de flexión por choque con probeta Charpy los valores eran:

- Bastante bajos comparados con las especificaciones de la normativa para los aceros actuales.
- Muy dispares para una misma temperatura de ensayo.
- La energía media estimada resultó ser menor en el ensayo a mayor temperatura.

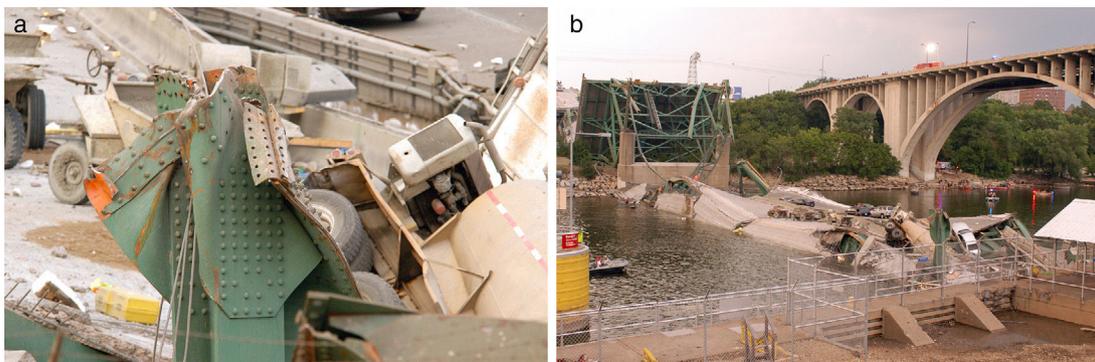


Figura 4. Vistas del puente colapsado.



Figura 6. Vista general del puente.

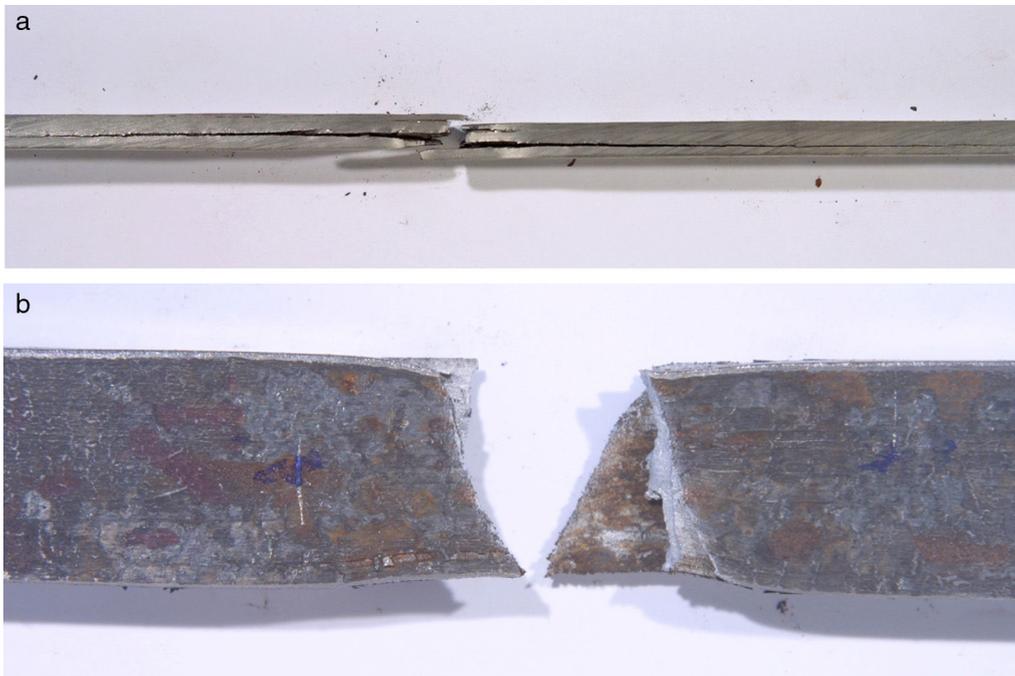


Figura 7. Vista de una probeta tras el ensayo de rotura a tracción.

Estas anomalías en la resiliencia del metal se debían fundamentalmente a la presencia de inclusiones no metálicas en la estructura metalográfica del acero. En todo caso, se puso de manifiesto la baja tenacidad del acero, lo que podría suponer que en algunas condiciones de carga la capacidad frente a la rotura frágil fuese menor que frente a la rotura dúctil.

En el análisis de la composición química se detectaron altos contenidos en azufre, que en presencia de bajos contenidos en manganeso (como era el caso) precipita en forma de sulfuro de hierro en los espacios intercristalinos, fragilizando el acero.

Así, si bien el puente no presentaba daños relevantes, se advirtió de que se trataba de un puente susceptible de desarrollar fallos frágiles ante defectos locales, por ejemplo fisuras de fatiga, perforaciones por corrosión, entallas, etc.

3.3. *Puente de vía estrecha en Asturias*

Este puente fue construido a principios del siglo xx, y está constituido por dos vanos rectos esviados isostáticos con una sección cajón formada por dos cuchillos de celosía tipo Warren de doble intersección (fig. 6).

Para investigar las características del material metálico se hicieron ensayos de tracción (fig. 7), resiliencia (Charpy), composición química y análisis de su estructura metalográfica. Así se determinó que era un acero similar al comentado en el puente anterior, si bien además en este caso se advertía claramente una serie de discontinuidades según los planos de laminación que comprometía en gran medida el comportamiento mecánico en sentido transversal (de forma análoga a lo que ocurre en los hierros pudelados).



Figura 8. Vista general del puente desde aguas arriba.



Figura 9. Hendiduras por corrosión en un patín inferior.

3.4. Puente ferroviario en Asturias

Cerca del puente comentado en el apartado 3.3, y de la misma época, se encontraba otro puente tipológicamente similar. En este caso el apoyo central era continuo sobre la pila, y la vía discurría sobre el plano superior de las celosías. La sección transversal también era un cajón con dos cuchillos verticales, con celosías tipo Warren de doble intersección (fig. 8).

En la inspección del puente se detectaron, además de los habituales daños por corrosión de chapas y otras anomalías, fisuras de fatiga en los cordones longitudinales inferiores de las celosías principales del puente cerca de secciones críticas frente a carga repartida. Estas fisuras solían arrancar de perforaciones y hendiduras provocadas por la corrosión metálica en chapas horizontales de los cordones (figs. 9 y 10).

En la inspección de los cordones superiores se observó además que la corrosión se había producido de manera más intensa en el contacto entre chapas del refuerzo frente a momentos negativos (cerca del apoyo central sobre la pila), produciendo una

merma brusca de la sección de la chapa, lo que generaba un efecto entalla y favorecía la concentración de tensiones en esa zona (fig. 11).

El análisis del acero puso de manifiesto que se trataba de nuevo de un acero al carbono no aleado en estado recocado cuyas prestaciones mecánicas frente a la rotura dúctil eran las habituales para los aceros de la época. Sin embargo, el acero presentaba una especialmente baja resiliencia en el ensayo Charpy, notablemente inferior al mínimo exigible actualmente incluso para una temperatura de 20 °C. Esta circunstancia era acorde con el hecho de que en el análisis de la composición química se detectó un especialmente alto contenido en azufre con muy bajo contenido en manganeso, lo cual, como se ha comentado en el apartado 3.2, fragiliza el metal.

Los daños detectados, junto con los indicios existentes de la baja tenacidad del metal, hacían que el riesgo de que se desarrollase un fallo frágil en la estructura no fuese asumible, de manera que el puente fue puesto fuera de servicio y posteriormente reforzado.

4. Conclusiones

La realización de inspecciones visuales es una herramienta, de por sí sola, no suficientemente eficaz para analizar la sensibilidad de los puentes metálicos antiguos ante la posibilidad de que se produzcan fallos frágiles. Es necesario complementar la información de las inspecciones con análisis adicionales que permitan estudiar los aspectos que gobiernan la susceptibilidad de la obra a desarrollar fallos frágiles a partir de daños o detalles que favorecen la concentración de tensiones (hendimientos por corrosión, fisuras de fatiga, etc.). Entre otros, algunos aspectos a tener en cuenta son:

- La posibilidad de desarrollar fisuras por fatiga, que depende de las características de los detalles de las uniones; de la magnitud, amplitud y frecuencia de los ciclos de carga; y de la propia tenacidad del material metálico. Siempre que sea

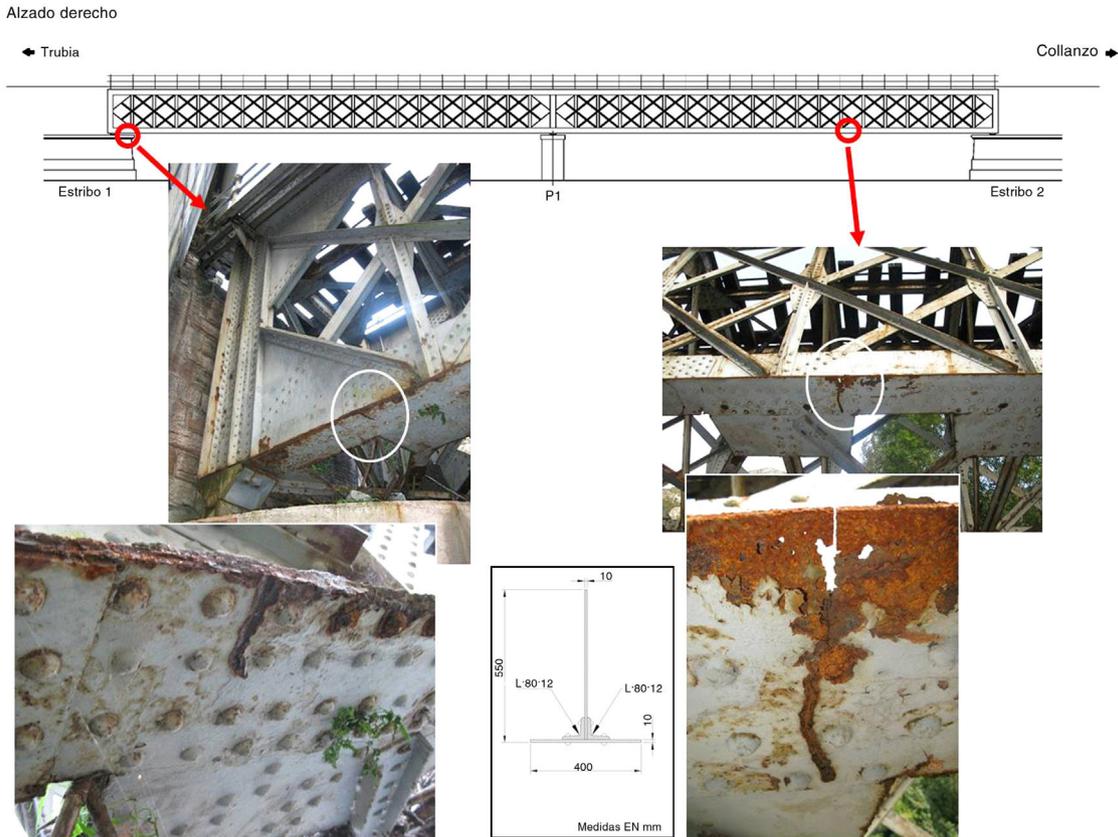


Figura 10. Fisuras en ala inferior del cordón inferior derecho.

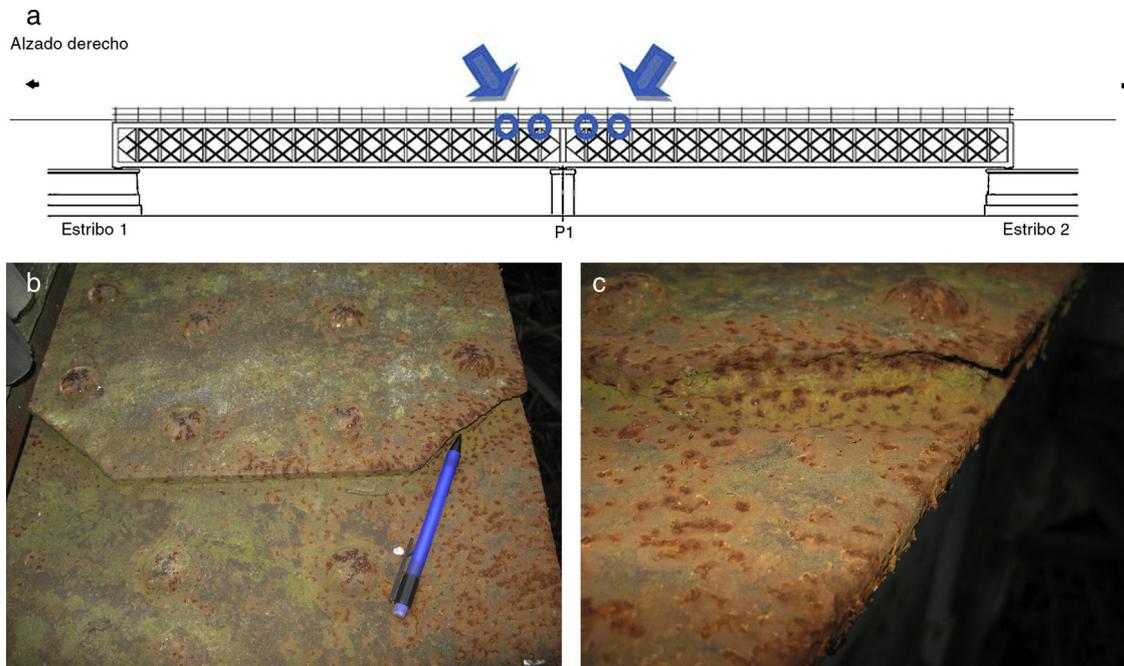


Figura 11. Daños por corrosión en el contacto entre chapas del ala de los cordones longitudinales superiores del puente.

posible es conveniente realizar estudios de fatiga de la estructura, mediante la instrumentación de la respuesta de la estructura ante las cargas que realmente la solicitan, análisis de detalles de uniones, etc., para establecer prioridades de

inspección identificando los elementos y nudos más críticos de la estructura. Estos estudios han de contemplar la posibilidad de que los apoyos en la práctica se encuentren bloqueados, añadiendo tensiones no previstas a la estructura.

- Las características mecánicas del metal. En una primera fase estas características pueden estimarse a partir de ensayos de tracción, composición química, análisis de su estructura metalográfica y de resiliencia Charpy. Este último ensayo permite realizar una primera aproximación de la tenacidad del metal de forma rápida y sencilla. Cabe señalar que todos los aceros comentados en los casos expuestos resultan químicamente soldables. Sin embargo, esta soldabilidad queda supeditada a las discontinuidades en la matriz metálica de algunos de ellos, que provocan su anisotropía y que condicionan el tipo de uniones soldadas que pueden ejecutarse.
- La época de construcción del puente es un factor a tener en cuenta, ya que de acuerdo con [1] existen dos periodos en los que se incrementan los casos de colapsos de puentes: los construidos entre 1870 y 1910 (debido a las características de los metales utilizados y a que fue un periodo de gran crecimiento del ferrocarril), y entre 1950 y 1970 (cuando se introduce la soldadura en la tecnología de construcción de puentes, apareciendo problemas por fragilización térmica, concentración de tensiones, etc.).
- La configuración más o menos redundante de la estructura frente a los distintos esfuerzos que la solicitan. Es decir, su robustez frente al fallo frágil de alguno de sus elementos.

Agradecimientos

Las imágenes de las figuras 3 y 4 han sido utilizadas por cortesía del *Minnesota Department of Transportation*. El resto

de imágenes han sido facilitadas por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento.

Los estudios de los puentes comentados en el presente artículo, salvo el caso del puente de la carretera I-35W en Minneapolis —que ha sido analizado a partir de la información pública disponible en Internet—, han sido realizados con personal y medios del CEDEX, a cuyo personal quiero manifestar mi sincero agradecimiento.

Bibliografía

- [1] B.M. Imam, M.K. Chryssanthopoulos, A review of metallic bridge failure statistics, Proceedings 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS'10). Philadelphia, USA, 2010 [consultado 27 May 2017]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/9426113.pdf>
- [2] Fatigue Evaluation of the Deck Truss of Bridge 9340, Department of Civil Engineering University of Minnesota, Minnesota Department of Transportation, 2001 [consultado 27 May 2017]. Disponible en: <https://www.lrrb.org/PDF/200110.pdf>
- [3] Steve Escher, Structural Causes of the Collapse, PBWorks, 2009 [consultado 27 May 2017]. Disponible en: <http://35wbridge.pbw.com/w/page/900761/Structural%20Causes%20of%20the%20Collapse>
- [4] Sea Stachura, The Big Question: Why Did the Bridge Fall Down? MPR-NEWS (2007) [consultado 27 May 2017]. Disponible en: <http://www.mprnews.org/story/2007/08/06/bridgetroubles>