

PUENTES ANTIGUOS DE ACERO. ¿REHABILITACIÓN O REEMPLAZO?

Polimeni Daneri, María Victoria^a; Polimeni, Martín Eduardo^b

^aFacultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, UCA, mvictoriapolimeni@gmail.com

^bFIUBA, eeppsingenieria@gmail.com

Palabras clave: puentes de acero antiguos, rehabilitación, redundancia, retrofitting, vida útil remanente.

RESUMEN

En la gran mayoría de los países existe una importante cantidad de puentes viales y ferroviarios metálicos cuya vida útil de servicio se encuentra, técnicamente, agotada. En ese sentido, esta cuestión genera una problemática de alto impacto técnico-económico, para la cual es imprescindible tener en claro un plan de gestión de activos que permita utilizar estas importantes estructuras en forma segura, evitando acciones por defecto o por exceso, ambas altamente perjudiciales. En el presente trabajo se mostrarán casos de éxito de rehabilitación de puentes antiguos de acero en el país. Se abordarán temas fundamentales como la evaluación de la redundancia estructural, el análisis fractomecánico, la determinación de la vida útil remanente, etc. Finalmente, se emitirán conclusiones que intentarán responder al interrogante objeto del presente trabajo.

ABSTRACT

In the vast majority of countries, there is a significant number of steel highway and railway bridges whose service life has technically expired. This situation poses a problem with a high technical and economic impact, making it essential to clearly establish an asset management plan that allows these important structures to be used safely, avoiding insufficient or excessive interventions, both of which can be highly detrimental.

In this paper, successful cases of rehabilitation of old steel bridges in the country will be presented. Fundamental concepts such as structural redundancy assessment, fracture mechanics analysis, determination of remaining service life, etc. will be addressed. Finally, conclusions will be drawn that seek to answer the key question that motivates this study.

Introducción

En las redes viales y ferroviarias de la gran mayoría de los países del mundo existen puentes de acero ejecutados a través de diseños y materiales que, en la actualidad, no serían aceptados ni recomendados por la normativa y las reglas del arte de la ingeniería estructural. Muchos de ellos fueron construidos con aceros “antiguos” (fines del siglo XIX y principios del XX), los cuales no cumplen en mayor o menor medida con los requerimientos normativos actuales. Asimismo, fueron ejecutados incluyendo diseños de lo que se conoce como “detalles constructivos vintage”, generalmente de alta susceptibilidad a la fatiga inducida por cargas o por deformación, así como sin un diseño conveniente de detalles que prevenga la susceptibilidad a la corrosión, tanto generalizada como localizada (principalmente por aireación diferencial (crevice)). Esta situación sinérgica hace que dichas estructuras hayan presentado a lo largo de su vida útil de servicio (y continúen haciéndolo) una vasta variedad de anomalías de mayor o menor significancia estructural, lo que exige su evaluación y probable intervención para que puedan continuar prestando servicio en forma segura.

Cabe aclarar que estas anomalías no provienen de falta de pericia en el diseño original de detalles constructivos, sino de modificaciones y/o correcciones de criterios de diseño derivados de las experiencias posteriores a la construcción de dichas estructuras (principalmente en el último cuarto del siglo pasado), como ocurre en cualquier otro campo de la ciencia, la tecnología, etc.

En este trabajo intentaremos determinar si, dada esta problemática, resulta justificable, tanto técnica como económicamente, reemplazar directamente la estructura deficitaria analizada o si, aun contemplando dicha problemática, resulta conveniente su rehabilitación estructural. Por otro lado, únicamente se tendrán en cuenta para la emisión de dichas conclusiones aspectos puramente estructurales, excluyendo cuestiones de preservación patrimonial, estéticas, de refuncionalidad, etc.

Diseño vs. Diagnóstico

Diseño y dimensionamiento estructural → métodos de análisis estructural convencionales.

- **Mecánica del Continuo.** Teorías de la elasticidad y plasticidad. Resistencia de materiales.
- **Cuerpos ideales**, homogéneos, isótropos y continuos.

Diagnóstico → se adicionan a los métodos de análisis convencionales, disciplinas fundamentales para el análisis de elementos estructurales fisurados.

- **Mecánica del Daño** (daño acumulado – $D = \sum n_i/N_i \leq 1$).
- **Mecánica de Fractura** (LEFM y EPFM – da/dN).
- **Cuerpos reales**, heterogéneos, anisótropos y discontinuos (fisuras).

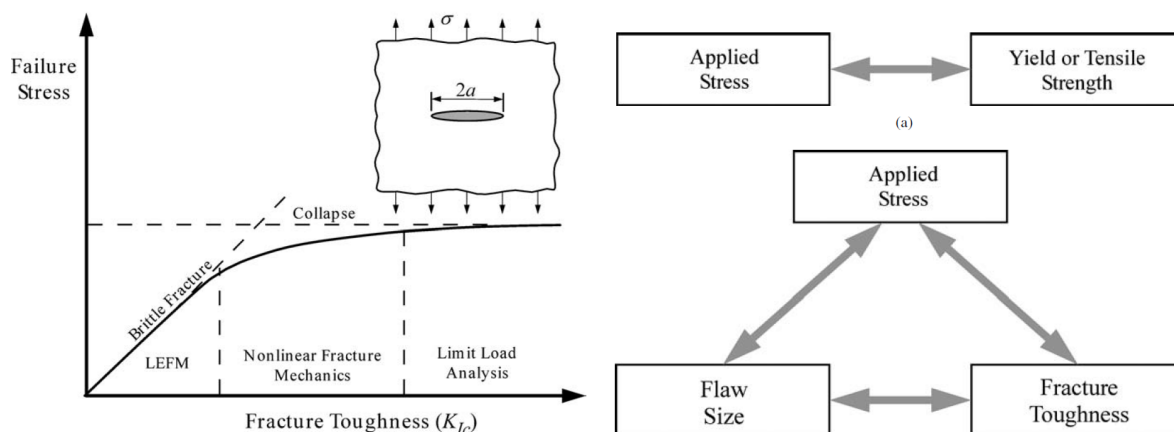


Figura 1. Criterios: resistente y fractomecánico

- Criterio basado en la **Resistencia de Materiales** → dos parámetros: σ - σ_y
- Criterio basado en la **Mecánica de Fractura** → tres parámetros: σ - a - K_{Ic}

La falla de un elemento estructural puede ocurrir debido al **agotamiento de la sección resistente** (Criterio basado en la **Resistencia de Materiales**) o debido a la **inestabilidad de una fisura** (Criterio **Fractomecánico**). El modo de falla predominante está determinado por la resistencia y tenacidad a la fractura del material.



Figura 2. Puente Ciudad de la Paz, CABA (inaug. 1913). Diagonal original fracturada

Soldabilidad del acero

En la práctica de la ingeniería estructural se suele clasificar los aceros en soldables y no soldables. Si bien esta es, en general, una simplificación válida, en circunstancias particulares como el diagnóstico y la rehabilitación de puentes de acero existentes, es preferible describir al acero como de **alta** o **baja soldabilidad**.

Asimismo, los principales ensayos a realizar para conocer la soldabilidad de un acero son la **composición química** de la aleación (y con ello, el carbono equivalente y posibles altos porcentajes de ciertos elementos que disminuyen tal condición, p. ej., S y P) y su **metalografía**, en busca de posibles impurezas, inclusiones laminares, etc.

Con dichos resultados, se tendrá un panorama razonablemente claro sobre la soldabilidad del material, sobre todo si los resultados son satisfactorios. Sin embargo,

si los resultados arrojan valores moderadamente altos de carbono equivalente y/o porcentajes elevados de elementos perjudiciales, es conveniente realizar ensayos físicos de soldabilidad antes de decidir la metodología de rehabilitación de la estructura (siempre existe la alternativa de resolver el eventual refuerzo mediante uniones abulonadas in situ).

Como ejemplo de lo anterior, puede indicarse el caso particular del acero constitutivo de la estructura del puente Ciudad de la Paz, ubicado en el barrio de Belgrano de la CABA, Argentina. Los valores del ensayo de Charpy (resiliencia e, indirectamente, tenacidad a la fractura) fueron considerablemente bajos y los porcentajes de P y S, significativamente altos (inclusiones no metálicas, MnS). *Prima facie*, este material no aparentaba ser apto para ser soldado en forma segura. En dicho contexto y con el fin de determinar qué tipo de unión diseñar en el proyecto de rehabilitación estructural, se decidió realizar ensayos físicos de soldabilidad en el Laboratorio de Materiales de la FIUBA. Los resultados indicaron que la soldabilidad era buena y que el diseño de rehabilitación mediante uniones soldadas era factible y seguro.

Fractomecánica

Aplicando la Mecánica de Fractura, puede establecerse la cantidad de ciclos hasta la falla correspondiente al crecimiento de una posible fisura detectada desde su longitud inicial hasta su valor fractomecánico o resistente crítico (los modos y superficies de falla de cada caso son claramente distintos).

Los **parámetros fractomecánicos** principales, correspondientes a la Mecánica de Fractura Elástica Lineal (LEFM), son el **Factor de Intensidad de Tensiones K** y la **Tenacidad a Fractura K_{Ic}** ¹. Finalmente, aplicando la **ley de propagación de fisuras de Paris**, Ec. (4), es posible estimar la **cantidad de ciclos hasta la falla** y, mediante su comparación con un histograma futuro de cargas, establecer la vida útil remanente de la estructura.

Si de dicho análisis se determinara que dicha **cantidad de ciclos hasta la falla** (aplicando un criterio de seguridad) es **superior** a la que corresponde a una **vida útil remanente futura esperada o deseada**, **no se requiere mayor intervención sobre la estructura**, más allá de posibles intervenciones menores. Si, por el contrario, la vida útil remanente resultante es menor a la esperada, será necesario intervenir en algún momento; sin embargo, dicha **intervención puede no ser urgentemente necesaria**, hecho clave en un **plan de acción** en gestión de activos.

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1)$$

$$a_c = 1/\pi \cdot \left(K_{Ic} / (Y \cdot \sigma_c) \right)^2 \quad (2)$$

$$\Delta K_e = Y \cdot \Delta \sigma_e \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (3)$$

$$da/dN = C \cdot (\Delta K_e - \Delta K_{th})^m \quad (4)$$

¹ La explicación de las razones por las cuales es posible aplicar la LEFM en un análisis de propagación de fisuras por fatiga en materiales con comportamiento considerablemente dúctil, como lo son los aceros (modernos e inclusive antiguos), excede el objetivo del presente trabajo.

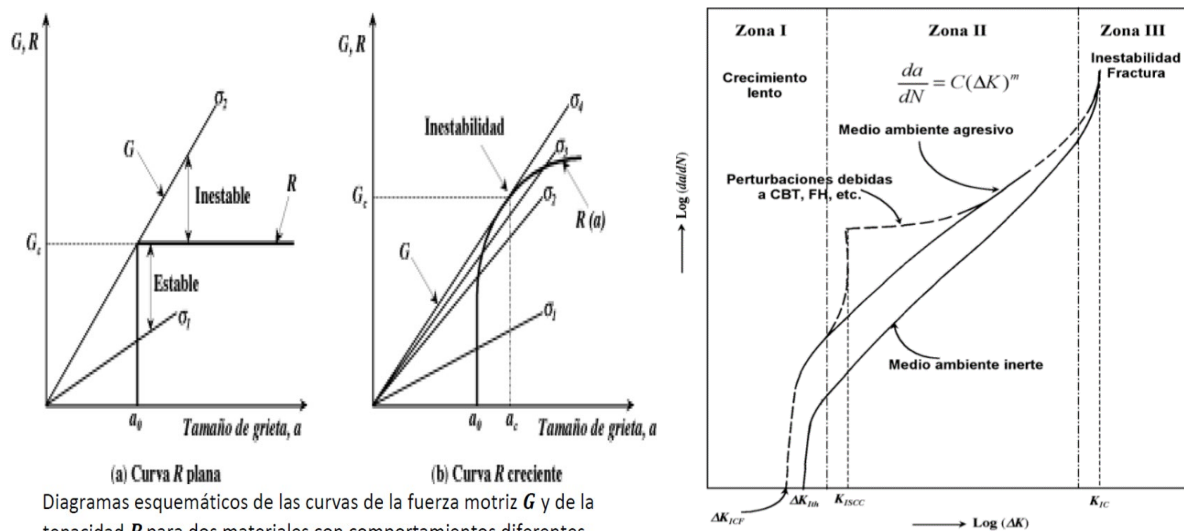


Figura 3. Gráficos clave de la Mecánica de Fractura. Izq.: Curvas R ($G-\Delta a$) para materiales de comportamiento frágil y dúctil y der.: Curvas de propagación de fisuras ($\log da/dN - \log \Delta K$)

Redundancia estructural

Para evaluar la redundancia de una estructura, primeramente, es necesario conocer el concepto de **Elemento de Fractura Crítica (FCM)** o, más recientemente, **Elemento Traccionado de Acero No Redundante (NSTM)**. Este concepto se define como Elemento Traccionado de Acero **No Redundante** que, ante su falla, **la estructura colapsa total o parcialmente** (caso emblemático: la falla de una barra de ojo de suspensión del puente Point Pleasant, en EE. UU., que produjo su colapso total en el año 1967).

Teniendo en cuenta lo anterior, puede indicarse que los **elementos comprimidos, fundamentalmente cordones superiores**, montantes y arriostramientos, **no son elementos de fractura crítica**, debido a que no son afectados por la acción de cargas cíclicas de tracción, o si lo son, su falla no acarrea el colapso total o parcial de la estructura.

Por otro lado, existen **tres tipos de redundancia estructural** que hacen que una estructura pueda “perder” algún elemento o subelemento principal (p. ej., falla por fatiga) pero que dicha situación no genere el colapso parcial o total de la estructura, ni siquiera una situación de fuera de servicio. En tal caso, **dicho elemento no debe considerarse como de fractura crítica**.

Los **tipos de redundancia estructural** son:

- **Camino alternativo de cargas.**

Se refiere a la posibilidad de que la **estructura redistribuya** las cargas a través del resto de la estructura. El caso más habitual es aquel en que existe **multiplicidad de elementos**.

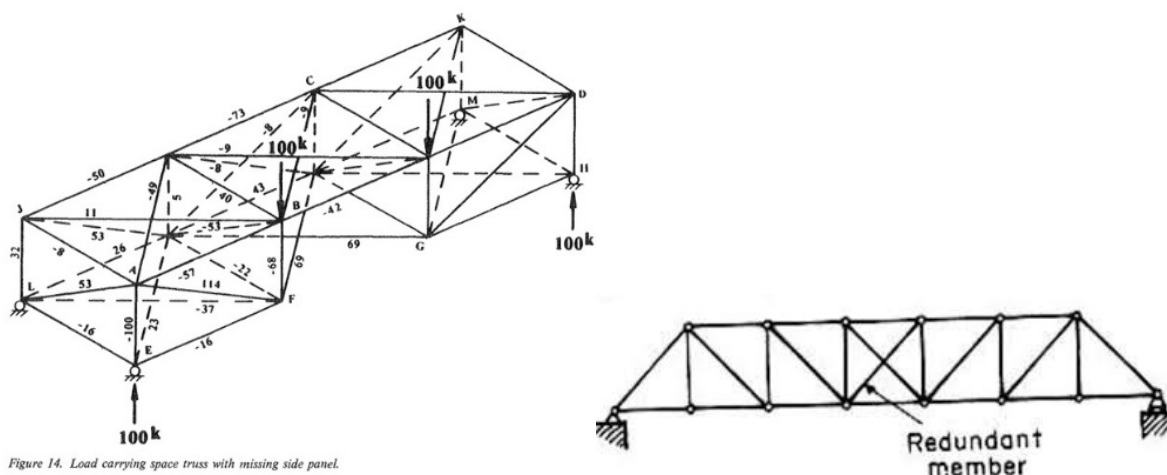


Figura 4. Redundancia estructural por camino alternativo de cargas

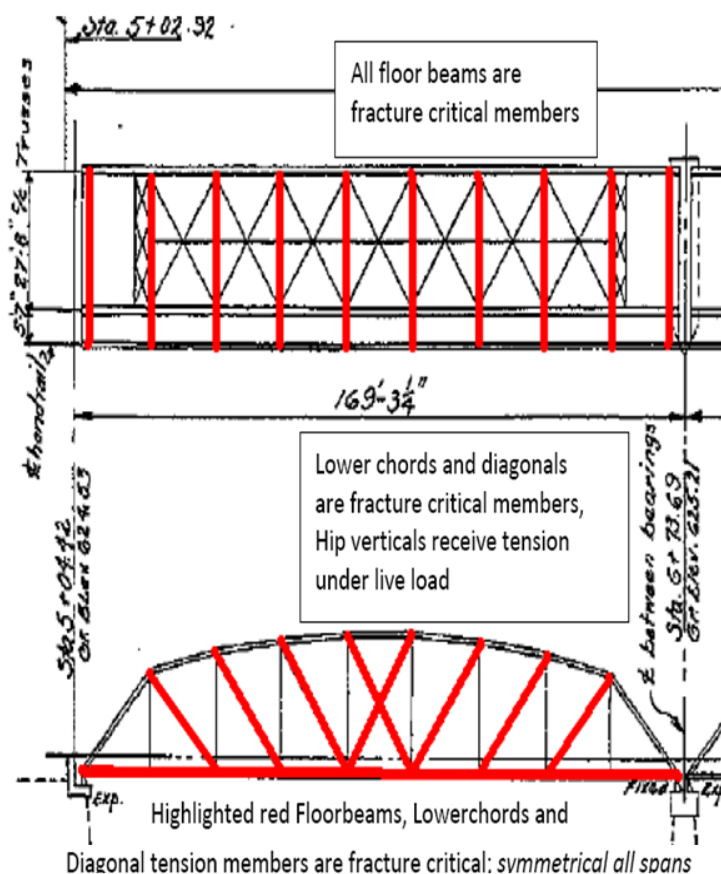


Figura 5. Ejemplo de Elementos de Fractura Crítica (FCM) de un puente reticulado de acero, simplemente apoyado

- **Hiperestaticidad – Sistema estructural**

Se refiere a los casos de estructuras **hiperestáticas** en las cuales la falla de un elemento principal no genera la hipoestaticidad de la estructura.

- **Redundancia interna**

Se refiere a estructuras formadas por elementos armados mediante **uniones**

discretas (abulonadas o roblonadas), en las cuales, ante la falla por propagación de una fisura de un subelemento que conforma un elemento estructural, **la propagación de dicha fisura no se transfiere a los demás subelementos conformantes** (debido a que las uniones no son continuas).

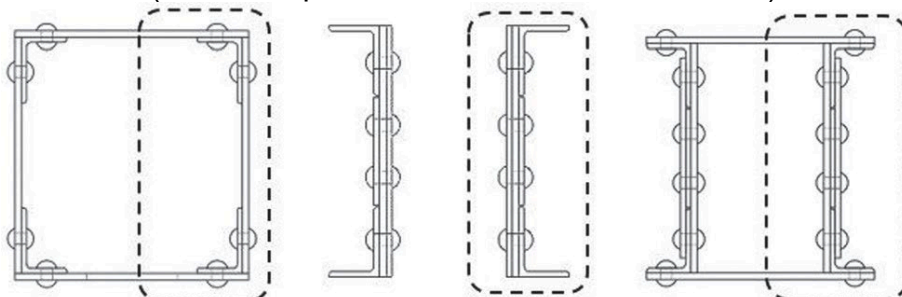


Figura 6. Ejemplo de secciones roblonadas con redundancia estructural interna

Este concepto se extiende a las uniones entre elementos independientes, que ante la eventual falla de uno de ellos por propagación de una fisura por fatiga, dicha fisura se interrumpe por el tipo de unión (discreta), sin posibilidad de propagación hacia el otro elemento.



Figura 7. Fractura detectada en inspección en un tensor del puente de arco y tensor, Hernando de Soto, Memphis, EE. UU.

En el caso de la estructura de un **puente existente**, pueden coexistir todos los tipos de **redundancia estructural y, más específicamente, en estructuras isostáticas antiguas, la redundancia por camino alternativo de cargas por multiplicidad de elementos** y la **redundancia interna** que poseen los elementos armados componentes de la estructura de un puente roblonado. Este **concepto** es de **fundamental importancia** en la evaluación de la **confiabilidad estructural** futura de

un puente antiguo existente.

La **metodología** más difundida y utilizada para la **evaluación de la redundancia** de una estructura es modelar numéricamente la estructura y **analizar su comportamiento global** ante distintos **escenarios de fallas** de elementos principales traccionados.

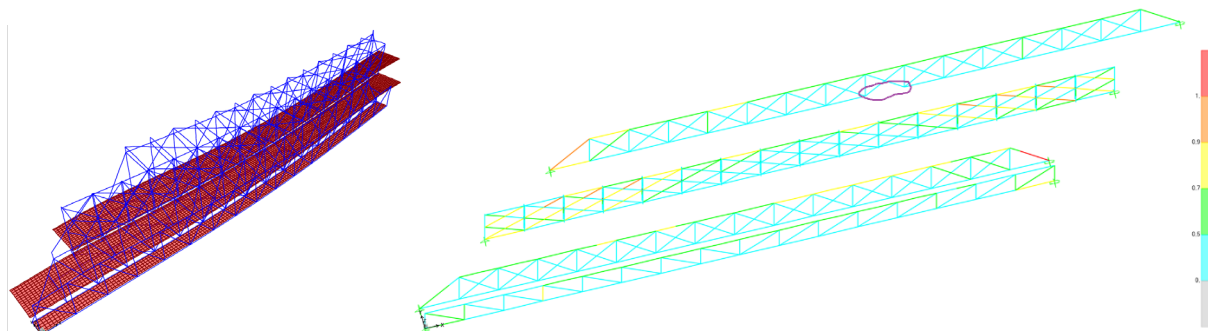


Figura 8. Evaluación de la redundancia estructural del Puente Ciudad de la Paz, CABA. Se muestra un escenario hipotético de falla de barra central de cordón inferior de una de las vigas principales.

Técnicas de rehabilitación más usuales.

Únicamente en los casos en los que el análisis estructural y fractomecánico arrojen resultados deficitarios (para acciones estáticas (cargas máximas de diseño) y/o cíclicas (fatiga – vida útil remanente)), será necesario intervenir la estructura (en mayor o menor medida y en el corto o mediano plazo).

Para tal fin, existe una serie de técnicas mundialmente validadas, que, correctamente utilizadas, individual o colectivamente, permiten el restablecimiento de la confiabilidad estructural de los puentes de acero existentes. Estas técnicas, entre otras posibles, son:

- **Mejoramientos de detalles constructivos:**
 - Arrestadores de fisuras (*stop holes*).
 - Tratamiento superficial de uniones soldadas.
 - HFMI: *High Frequency Mechanical Impact*, para el mejoramiento a fatiga de uniones soldadas.
 - Flexibilización de uniones con el objetivo de atenuar deformaciones inducidas.
 - Reemplazo localizado de elementos dañados.
 - Enderezamiento mediante calor de elementos deformados.
 - Técnicas de atenuación de triaxialidades de tracción.

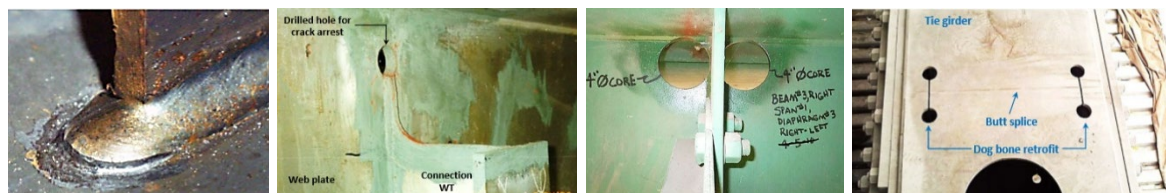


Figura 9. Distintas técnicas de mejoramiento de detalles constructivos. De izq. a der.: tratamiento superficial de soldaduras, flexibilización de uniones, eliminación de triaxialidad de tracción y arrestadores de fisuras.

Organiza:

- **Refuerzo estructural:**

- Agregado de acero o FRP.
- Postesado externo.
- Composición estructural hormigón-acero.



Figura 10. Distintas técnicas de refuerzo estructural. De izq. a der.: agregado de acero, postesado externo y composición estructural hormigón-acero.

Casos exitosos de rehabilitación estructural de puentes existentes de acero en la Ciudad de Buenos Aires

Los conceptos vertidos en el presente trabajo fueron utilizados en la rehabilitación de puentes de acero existentes de gran importancia funcional y patrimonial, en la CABA, los cuales presentaban distintos grados de deterioro como consecuencia del servicio prestado y de la acción medioambiental. En todos los casos, se ejecutaron tareas de diagnóstico estructural y de proyecto de rehabilitación, restableciendo la confiabilidad estructural de acuerdo con las exigencias de las reglas del arte de la ingeniería estructural, para una vida útil remanente altamente conveniente, a un costo sensiblemente menor del que hubiese significado el reemplazo de cada cruce, cualquiera que hubiese sido la tipología estructural elegida para tal fin.

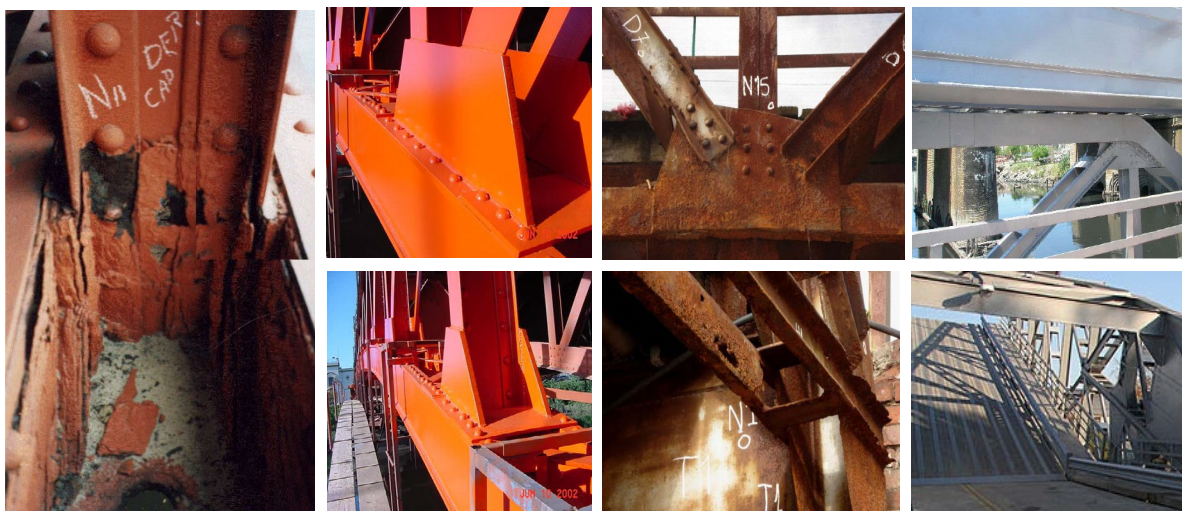


Figura 11. Casos de éxito de rehabilitación de puentes de acero existentes en la CABA. Puentes La Noria (2001) y Bosch (2008).

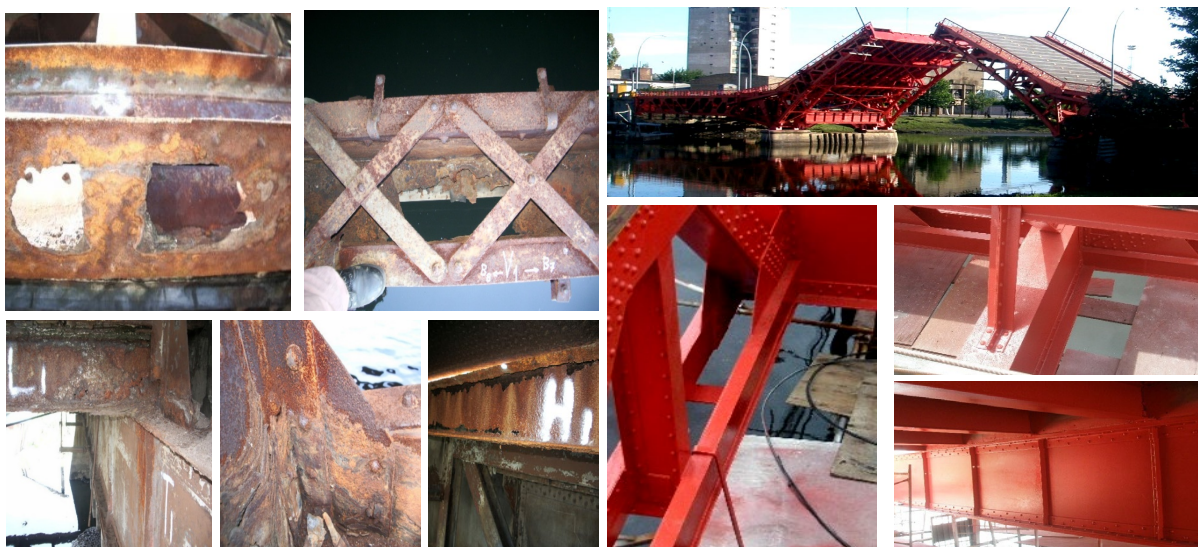


Figura 12. Casos de éxito de rehabilitación de puentes de acero existentes en la CABA. Puente Pueyrredón Viejo (2010).



Figura 13. Casos de éxito de rehabilitación de puentes de acero existentes en la CABA. Puente Ciudad de la Paz (2025).

Conclusiones

La **gestión de puentes existentes**, tanto de acero como de hormigón, es una **problemática generalizada en todo el mundo**. En particular, los puentes de acero han sufrido, a lo largo de su vida de servicio, distintos grados de daño acumulado, tanto por fatiga inducida por las cargas vivas de servicio y/o por deformación como por la acción medioambiental de la corrosión².

Asimismo, **no parece factible ni justificable técnica, económica y operativamente asumir que es necesario reemplazar cualquier puente existente** por el mero hecho de presentar anomalías y/o por considerar que ya ha cumplido con su vida útil.

Con el fin de tomar la **decisión más conveniente** entre la rehabilitación y el reemplazo, previamente deben analizarse distintas **variables**, entre ellas: su **funcionalidad**, **afectaciones al servicio general**, **costos comparativos**, **valor**

² Incluso puede sumarse la altamente gravosa fatiga de ultra bajo ciclaje (ULFC) que generan las acciones sísmicas.

histórico, etc.

El **reemplazo sistemático de puentes existentes que presentan anomalías estructurales por su servicio pasado es, prácticamente, inviable desde el punto de vista operativo**, sobre todo en la gestión de grandes redes ferroviarias y viales.

En tal sentido, el documento FHWA-HIF-18-022 de los EE. UU. indica: “... *tener un enfoque de “lo peor primero” en la gestión de puentes, centrándose únicamente en reemplazar los puentes en mal estado mientras se ignoran las necesidades de mantenimiento de los puentes en buen y regular estado, es ineficiente y costo-prohibitivo a largo plazo. Un programa de puentes exitoso busca un enfoque equilibrado entre la preservación y la rehabilitación/reemplazo.*”

Herramientas como la **Mecánica de Fractura** permiten **evaluar la confiabilidad actual y futura** de una estructura existente y, a su vez, programar **operativa, económica y financieramente, las posibles tareas de intervención**.

Tecnologías más recientes, como el **monitoreo de salud estructural** (incluidas las deformaciones cíclicas), las inspecciones mediante **drones** y las técnicas avanzadas de **ensayos no destructivos**, entre otras, aportan información de alta calidad y precisión que facilita la evaluación estructural de puentes existentes.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad de la solución, el **reemplazo destruye acero** ya producido y **genera una enorme huella de carbono**, mientras que la **rehabilitación reutiliza material existente, reduciendo emisiones drásticamente**.

En general, **puede asegurarse que el reemplazo estructural solo puede justificarse tanto técnica como económicamente en situaciones muy particulares** (fundamentalmente ante considerables repotenciaciones o refuncionalizaciones). Será **menester que las autoridades administradoras** de dichos activos, apoyándose en **asesoramiento experto**, tomen dicha decisión.

Referencias

- [1] POLIMENI, F.: “Comportamiento del Acero Estructural” SOMISA (1986).
- [2] POLIMENI, M.: “Rehabilitación del Puente Colgante Marcial Candiotti”. XVII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (2002).
- [3] POLIMENI, M.: “Reparación de un Puente Vial de Estructura Metálica”. XVIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (2004).
- [4] POLIMENI, M.: “Aceptación de Defectos Mecánicos en Estructuras”. XX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (2008).
- [5] POLIMENI, M.: “Rehabilitación del Puente Pueyrredón Viejo”. XXI Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (2010).
- [6] POLIMENI, M.: “Análisis de la Confiabilidad de Estructuras Metálicas sometidas a Cargas Cíclicas”. XXIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (2014).
- [7] POLIMENI, M.: “Rehabilitación Estructural de Puentes Ferroviarios Metálicos”. XXIV Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (2016).
- [8] POLIMENI, M.: “Diagnóstico y Rehabilitación de Puentes Ferroviarios de Acero”. XXVI Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (2020).
- [9] POLIMENI, F.; POLIMENI, M.: “Introducción a la Mecánica de Fractura” dictado en la AIE Asociación de Ingenieros Estructurales (2005).
- [10] POLIMENI, F.; POLIMENI, M.: “Corrosión y Protección de Estructuras de Acero” dictado en la AIE Asociación de Ingenieros Estructurales (2006).
- [11] Bowman, M., and Piskorowski, A. FHWA/IN/JTRP-2004/4 Evaluation and Repair of Wrought Iron and Steel Structures in Indiana. Purdue University. 2004.
- [12] Haghani, R., Al-Emrani, M., and Heshmati, M. Fatigue-Prone Details in Steel Bridges. Buildings ISSN 2075-5309. 2012.
- [13] Dexter, R. J., and Ocel, J. M. FHWA-IF-13-020. Manual for Repair and Retrofit of Fatigue Cracks in Steel Bridges. 2013.
- [14] Klaiber, F. W.; Dunker, K. F.; Wipf, T. J., and Sanders, JR, W. W. Methods of Strengthening Existing Highway Bridges. NCHRP 293. 1987.
- [15] FHWA-HIF-18-022. Bridge Preservation Guide - Maintaining a Resilient Infrastructure to Preserve Mobility. 2018.
- [16] Russo, F. M., Mertz, D. R., Frank, K. H., and Wilson, K. E. FHWA-NHI-16-016. Design and Evaluation of Steel Bridges for Fatigue and Fracture. 2016.
- [17] Ripling, E. J., Crosley, P. B., and Armstrong, R. W. FHWA-RD-90-008. Brittle-Ductile Transition of Bridge Steels. 1990.
- [18] Barsom, J. M., and Rolfe, S. T. Fracture and Fatigue Control in Structures. Applications of Fracture Mechanics, Third Edition. ASTM. West Conshohocken, PA. 1999.
- [19] Fisher, J. W. Fatigue and Fracture in Steel Bridges. Case Studies. John Wiley. New York, NY. 1984.

- [20] Connor, R., and Fisher, J. Identifying Effective and Ineffective Retrofits for Distortion Fatigue Cracking in Steel Bridges Using Field Instrumentation. Journal of Bridge Engineering, Vol. 11, No. 6, 745–752. 2006.
- [21] Guo, T., and Chen, Y. W. Fatigue Reliability Analysis of Steel Bridge Details based on Field Monitored Data and Linear Elastic Fracture Mechanics. Structure and Infrastructure Engineering, 9(5), pp. 496–505. 2013.
- [22] Connor, R. J., and Lloyd, J. B. Maintenance Actions to Address Fatigue Cracking in Steel Bridge Structures - Proposed Guidelines and Commentary. NCHRP Project 20-07, Task 387. 2017.
- [23] Fisher, J. W., Kulak, G. L., and Smith, I. F. C. A Fatigue Primer for Structural Engineers. NSBA. 1998.
- [24] Robert Sonnenschein, Katarina Gajdosova, Ivan Holly. FRP Composites and Their Using in the Construction of Bridges. World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium 2016, WMCAUS 2016.