

# “Valencia bridge fire tests”, análisis experimental de la respuesta de puentes frente al fuego

*“Valencia bridge fire tests”, experimental analysis of the response of bridges to fire*

Ignacio Payá Zaforteza<sup>\*,a</sup>, José Alós Moya<sup>b</sup>, Antonio Hospitaler Pérez<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Catedrático de Universidad, Universitat Politècnica de València, ICITECH, igpaza@est.upv.es

<sup>b</sup> Investigador, Universitat Politècnica de València, ICITECH, joalmo11@cam.upv.es

<sup>c</sup> Catedrático de Universidad, Universitat Politècnica de València, ICITECH, ahospitaler@est.upv.es

## RESUMEN

La importancia del fuego en los puentes ha impulsado numerosas investigaciones basadas en modelos numéricos que necesitan una validación experimental. Este artículo resume las enseñanzas de unos ensayos realizados en Valencia en condiciones similares a las reales, los *Valencia Bridge Fire Tests*, con un puente mixto bijácena. Los ensayos muestran que (1) las temperaturas de las vigas tienen un importante gradiente longitudinal y (2) la magnitud del fuego y su posición son los factores clave en la respuesta del puente. El estudio ha permitido validar modelos numéricos fundamentales para determinar la vulnerabilidad de los puentes al fuego y para proteger los puentes críticos.

## ABSTRACT

The importance of bridge fires has motivated significant research in recent years based on the use of numerical models which require experimental validation. This paper summarises the lessons learned with several tests carried out with an experimental bridge built in Valencia under conditions similar to those of real bridge fires. Results show that: (1) temperatures along the girders experience an important longitudinal gradient and (2) the magnitude of the fire and its position are the key factors in the bridge response. This study has enabled the validation of numerical models crucial for the determination of the vulnerability of bridges vis-à-vis fire hazards and for the protection of critical bridges.

**PALABRAS CLAVE:** Valencia bridge fire tests, fuego, puente mixto, resiliencia, diseño prestacional.

**KEYWORDS:** Valencia bridge fire tests, fire, composite bridge, resilience, performance based design.

## 1. Introducción.

Los puentes son elementos críticos de las infraestructuras de transporte que han sufrido importantes daños como consecuencias de incendios (véase por ej. Garlock et al [1]). Sin embargo, la comunidad científico-técnica ha prestado muy poca atención en el pasado a los incendios en puentes a pesar de que éstos son sustancialmente diferentes a los incendios en túneles y edificios y, por lo tanto, necesitan una

metodología particular (véase [2] para más detalles). Las especiales características de los incendios en puentes junto con la ausencia de normativas o recomendaciones que guíen sobre cómo abordar este problema, han motivado mucha investigación en los últimos años en temas como el análisis de riesgos (véase por ej. [3, 4]) o la respuesta al fuego de puentes de vigas, celosías, colgantes y atirantados (véanse por ej.

[5-13]). Estos trabajos han empleado tanto metodologías simplificadas (véase por ej. [5]) como métodos de cálculo avanzados (por ej. [6-13]) y, aunque suponen un avance importante, necesitan una validación experimental. Además, las normativas relacionadas con el proyecto de puentes o el diseño de estructuras frente al fuego (véase por ej. [14-16]) no proporcionan indicaciones de cómo tratar el problema. En este contexto, este artículo resume los principales resultados y conclusiones de unos experimentos realizados en el campus de la Universitat Politècnica de València, los *Valencia bridge fire tests*, con un puente bixágena mixto con los siguientes objetivos: (a) permitir la calibración de los modelos numéricos empleados en la ingeniería del fuego aplicada a los puentes y (b) proporcionar información cualitativa de las principales características de los incendios en puentes. Una descripción más detallada de los ensayos puede encontrarse en Alós-Moya et al. [2] y una validación numérica de métodos simplificados y analíticos de los experimentos realizados puede encontrarse en Alós-Moya et al. [17].

## 2. Descripción del puente

La Figura 1 muestra el puente experimental construido. El puente está formado por:

1. Dos estribos de hormigón armado.
2. Un tablero mixto con una luz de 6 m apoyado en los estribos mediante apoyos elastoméricos. El tablero está formado por una losa de hormigón armado de 15 cm de canto y 2 m de anchura conectado a dos vigas IPE-160. La separación transversal entre los ejes de las dos vigas es 1 m.
3. Dos pórticos metálicos en los que se fijaron LVDTs empleados para medir las flechas del tablero durante los ensayos.

Se eligió este sistema estructural porque: (1) es muy habitual en puentes de luces cortas y medias, (2) de acuerdo con el estudio realizado por Peris-Sayol et al. [2], éste es el sistema estructural más habitual entre los puentes que colapsaron o sufrieron daños graves en incendios reales.

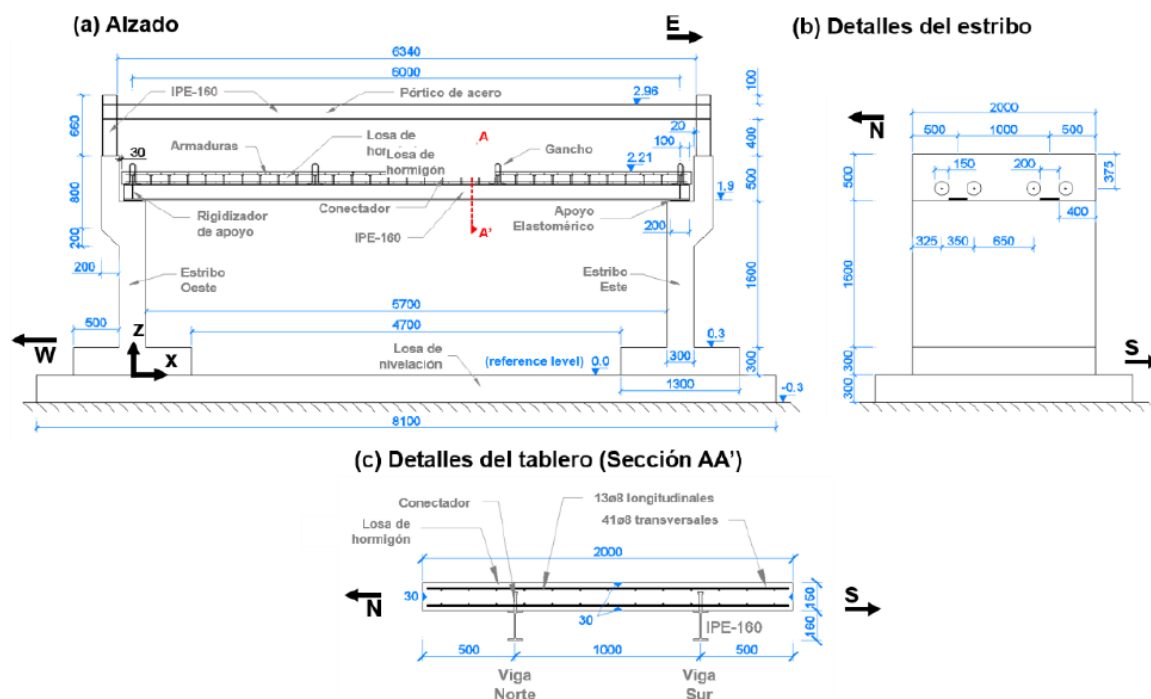


Figura 1. Detalles del puente experimental. Todas las dimensiones están en mm. Todas las cotas están en m.

Los materiales empleados para la construcción del puente fueron ensayados, determinándose que el hormigón del tablero tenía una resistencia a la compresión media de 33 MPa y un módulo de elasticidad promedio de 33.8 GPa. Por su parte, el acero estructural de las vigas del tablero tenía un límite elástico medio de 360.5 MPa y una carga de rotura media de 488.5 MPa. La conexión se diseñó para que hubiera una conexión total, incluso en presencia de las elevadas temperaturas que se preveían durante los ensayos.

### 3. Campaña experimental

#### 3.1 Escenarios de incendio

Antes de construir el puente experimental se realizó una batería de ensayos preliminares con la finalidad de caracterizar las cargas de incendio y establecer un protocolo para poder hacer los ensayos de forma segura (véase Alos-Moya et al [2] para más detalles). Tras los ensayos preliminares se realizaron ocho ensayos bajo el puente terminado correspondientes a cuatro escenarios de incendio diferentes. Estos escenarios se diferenciaban por la magnitud y posición de la carga de fuego (véase la Tabla 1 y la Fig. 2). La carga de fuego se ubicó bajo el tablero por ser ésta la posición más desfavorable de acuerdo con el análisis estadístico realizado por Peris-Sayol et al. [2]. En los Tests 5 y 6 se

colocó, además, una protección frente al fuego entre las vigas en una longitud de 1.65 m.

La carga de fuego se materializó vertiendo gasolina en una bandeja, definiéndose su magnitud por la Tasa de Liberación de Calor (*Heat Release Rate* en inglés, HRR). El HRR se obtuvo según la metodología explicada por Drysdale [18] y considerando que en los *Valencia bridge fire tests* se empleó gasolina como combustible. Hay que recalcar que las cargas de fuego empleadas son menores que las presentes en los accidentes causados por los camiones cisterna que transportan combustible. No obstante, esta diferencia no es importante si se tienen en cuenta las circunstancias siguientes:

- Los objetivos de la investigación hacían necesaria la realización de varios experimentos, por lo que el puente no debía sufrir un daño excesivo durante los ensayos.
- Las temperaturas alcanzadas por las vigas de acero en el Test 8 fueron similares a las de los incendios reales.
- La carga de fuego fue lo suficientemente alta como para provocar que las llamas afectaran a las vigas metálicas, como sucede normalmente en los incendios de los camiones cisterna bajo los puentes.
- Motivos económicos, ambientales y de seguridad hicieron imposible emplear cargas de fuego similares a las habituales en un accidente típico de un camión cisterna.

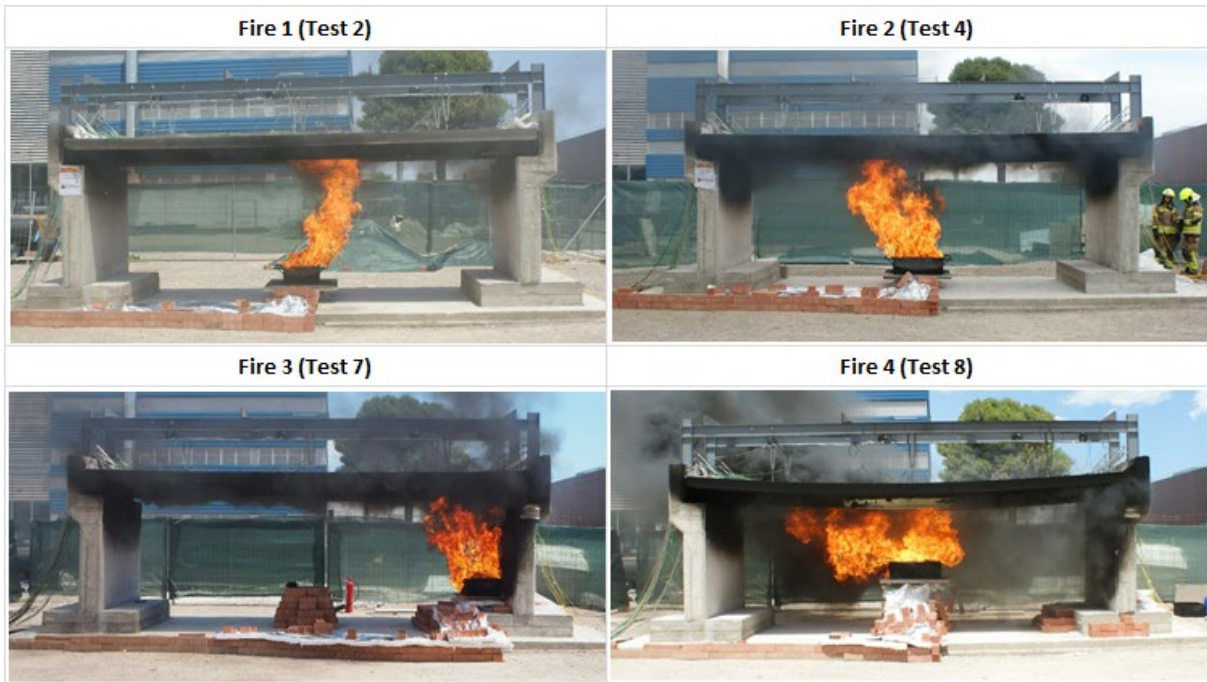


Figura 2. Valencia bridge fire tests. Imágenes mostrando los escenarios de incendio considerados.

Tabla 1. Escenarios de fuego de la campaña experimental.

Escenario	Ancho bandeja (m)	Posición fuego	HRR (kW)	Ensayo	Distancia al Estribo Este x (m)	Posición bandeja	
						x (m)	z (m)
Fire 1	0.50	CL	415	1	-	3.00	0.2
				2	-	3.00	0.2
Fire 2	0.75	CL	1131	3	-	3.00	0.2
				4	-	3.00	0.2
Fire 3	0.50	Lateral	415	5	0.33	5.27	0.5
				6	0.01	5.59	0.5
				7	0.01	5.59	0.5
Fire 4	0.75	CL	1131	8	-	3.00	0.8



Figura 2. Elementos característicos del montaje del ensayo.

### 3.2 Monitorización de los ensayos

Las siguientes variables se monitorizaron de forma continua durante los ensayos:

- Peso de gasolina, que se empleaba para obtener la evolución del HRR durante los ensayos. Esta variable se midió con una balanza.
- Temperaturas en el gas alrededor del tablero y en el tablero. Se emplearon para ello termopares tipo K (TCs).
- Flechas en varios puntos mediante LVDTs.

Se instalaron un total de 72 TCs y 22 LVDTs. Además, 17 sensores ópticos de muy alta temperatura desarrollados por Rinaudo et al. [19, 20] se colocaron también en el tablero para comprobar su comportamiento en condiciones

reales de incendio. La Fig. 3 muestra algunos de los equipos empleados en la monitorización. Una descripción más detallada de los mismos puede encontrarse en Alós-Moya et al. [2].

### 3.3 Temperaturas en el gas

Las máximas temperaturas en el gas se produjeron en la zona entre las vigas metálicas y variaron entre los 320°C (Escenario Fire 1) y 920°C (Escenario Fire 4). La Figura 4 muestra las temperaturas medidas durante los ensayos 7 y 8 en la zona central entre las dos vigas del puente y en dos secciones transversales significativas. Las temperaturas del gas experimentaron un gradiente longitudinal significativo: 350°C/m en el escenario Fire 4 y 220°C/m en el escenario Fire 3.

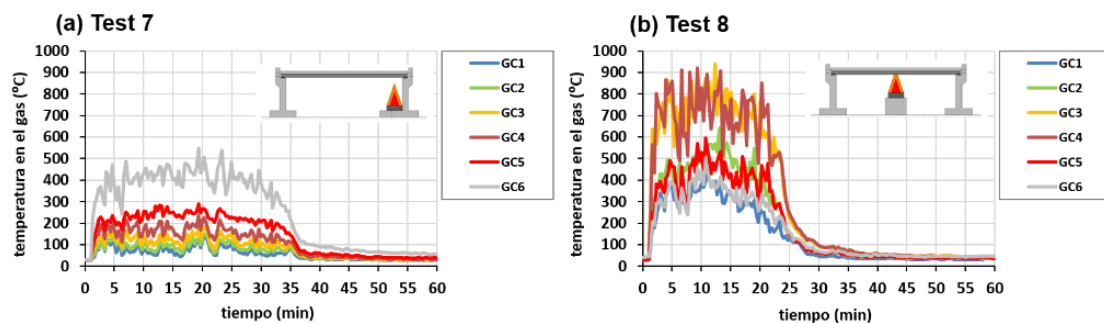


Figura 4. Temperaturas medidas en la zona central entre las dos vigas del puente. Izquierda:(a) Escenario Fire 3, Test 7; Derecha: Escenario Fire 4, Test 8. GC1, GC 2, GC 3, GC4 y GC 6 son los nombre de los seis TCs empleados para medir la temperatura en la zona central. Están ubicados en las secciones con coordenada “x” 0.5 m, 1.5 m, 2.5 m, 3.5 m, 4.5 m and 5.5 m respectivamente.

### 3.4 Temperaturas en el acero

Las máximas temperaturas en el acero alcanzaron valores máximos de 226°C, 512 °C, 469°C y 749°C para los escenarios Fire 1, Fire 2, Fire 3 y Fire 4 respectivamente. Las temperaturas en el acero también experimentaron variaciones importantes a lo largo del eje longitudinal del Puente (véase la Fig. 5) con unos gradientes térmicos de 250°C/m para el escenario Fire 4,

200 °C/m en los escenarios Fire 2 y Fire and 3, y 60 °C/m en el escenario Fire 1. Por lo tanto, no es realista asumir un calentamiento uniforme del puente a lo largo de su eje longitudinal.

Otra observación importante es que las temperaturas en el ala inferior y en el alma fueron muy similares y mayores que las temperaturas de las alas superiores (véase la Fig. 6a que muestra las temperaturas máximas en diferentes elementos de las vigas del puente). Las temperaturas de las alas superiores resultaron ser

muy inferiores debido a la protección ejercida por la losa de hormigón. Finalmente, los experimentos muestran que los factores que más afectan a la respuesta del puente son la potencia del fuego y la distancia vertical del fuego al tablero. La Fig. 6b muestra la evolución de las flechas en la sección central del tablero de la Viga Norte en cuatro de los ensayos realizados (los

resultados fueron similares para la Viga Sur, por lo que no se muestran aquí). La flecha máxima fue 0.12 m y se alcanzó en el Test 8 durante seis minutos. Las vigas no sufrieron ninguna plastificación porque todas las deformaciones se recuperaron cuando el ensayo terminó.

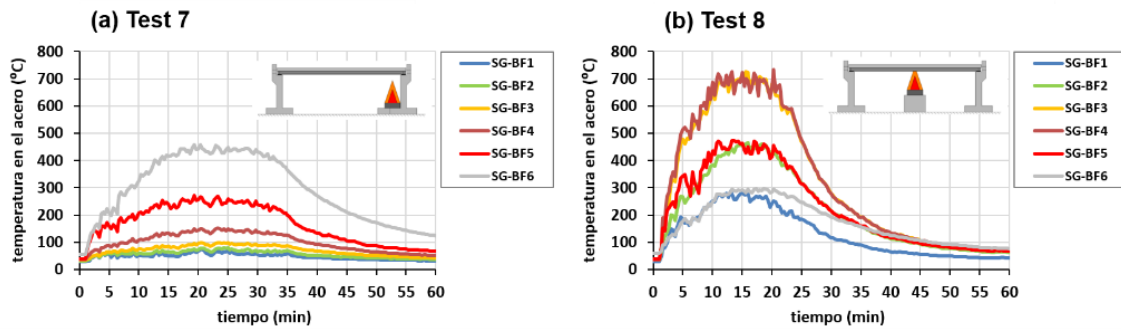


Figura 5. Temperaturas registradas en el ala inferior de la Viga Sur. Izquierda:(a) Escenario Fire 3, Test 7; Derecha: Escenario Fire 4, Test 8. SG-BF1, SG-BF2, SG-BF3, SG-BF4, SG-BF5 y SG-BF6 son los nombres de los seis TCs empleados para medir temperaturas en el gas del ala inferior de la Viga Sur. Estuvieron colocados en las secciones con coordenadas “x” 0.5 m, 1.5 m, 2.5 m, 3.5 m, 4.5 m y 5.5 m respectivamente.

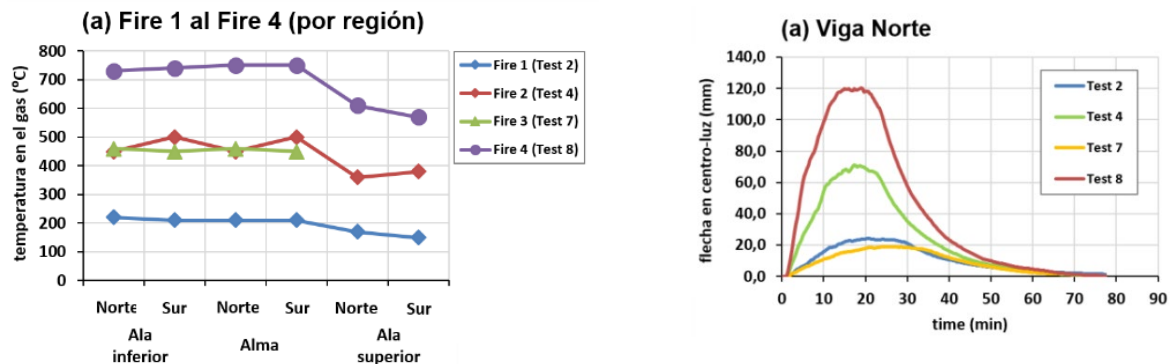


Figura 6. (a) Máximas temperaturas en el acero por región, (b) máximas flechas en la sección de centro-luz de la Viga Norte.

## 4. Conclusiones

Este artículo describe una batería de ensayos realizados en la Universitat Politècnica de València en su campus de Valencia para mejorar el conocimiento actual sobre la respuesta de los puentes al fuego. En total se realizaron de ocho ensayos que implicaron diferentes cargas de fuego en diferentes

posiciones bajo un puente bixárceno mixto con una luz de 6 m. De los ensayos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las temperaturas en el gas alcanzaron valores máximos en la zona central situada entre las dos vigas y experimentaron importantes variaciones a lo largo del eje longitudinal del puente. Por ejemplo, el gradiente térmico longitudinal fue de

350°C/m para el escenario Fire 4 y 220°C/m para el escenario Fire 3.

- Las temperaturas en el acero también experimentaron variaciones significativas a lo largo del eje longitudinal del puente (gradientes térmicos de 250°C/m para el escenario Fire 4, 200 °C/m en los escenarios Fire 2 y 3, y 60°C/m en el escenario Fire 1). Por lo tanto no es realista asumir un calentamiento uniforme de las vigas.
- Las temperaturas máximas en las alas y alas inferiores fueron muy parecidas. Las temperaturas en las alas superiores fueron significativamente menores debido a la protección del ala superior ejercida por la losa de hormigón.
- Los experimentos demuestran que la potencia del fuego y la distancia vertical entre el fuego y el tablero del puente son los factores que más afectan a su respuesta estructural. Esta influencia ya había sido prevista por el análisis empleando técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional realizado por Peris-Sayol et al. [2], pero los experimentos aquí presentados han permitido comprobar experimentalmente esta influencia por primera vez.

Finalmente, hay que destacar que los resultados de estos ensayos son de gran importancia porque han proporcionado información cualitativa y cuantitativa de gran interés necesaria para la validación de los modelos numéricos empleables en la ingeniería del fuego aplicada a los puentes. Estos modelos son, a su vez, un paso previo para la mejora de la resiliencia de los puentes frente al fuego. De cara a un futuro, sería conveniente la realización de ensayos similares a los aquí descritos o, mejor aún, con potencias mayores de incendio en ausencia de viento para eliminar las incertidumbres introducidas por éste. Para ello, los ensayos deberían realizarse en un espacio cerrado como el disponible en el National Fire

Research Laboratory del National Institute of Standards and Technology (NIST) de los USA.

### *Agradecimientos*

Esta investigación ha sido posible por la financiación recibida por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto de Investigación BIA 2011–27104). Además, los autores desean expresar su gratitud al Cuerpo de Bomberos de la ciudad de València y al personal encargado de la gestión de las infraestructuras y la seguridad de la Universitat Politècnica de València por el apoyo prestado para la realización de los ensayos.

### *Referencias*

- [1] M.E. Garlock, I. Paya-Zaforteza, V. Kodur, L. Gu. Fire hazard in bridges: review, assessment and repair strategies. *Engineering Structures* 35 (2012). pp 89-98.
- [2] J. Alos-Moya, I. Paya-Zaforteza, A. Hospitaler, P. Rinaudo. Valencia bridge fire tests: Experimental study of a composite bridge under fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 138 (2017) 538-558.
- [3] H. Gil, S. Seo, C. Park. Fire Risk Management for Highway Bridges in Korea. IABSE Conference Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges Geneva (Switzerland) (2015) 890-896.
- [4] G. Peris-Sayol G, I. Paya-Zaforteza, S. Balasch-Parisi, J. Alos-Moya. Detailed Analysis of the Causes of Bridge Fires and Their Associated Damage Levels. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 31(3) (2017).
- [5] S.E. Quiel, T. Yokoyama, L.S. Bregman, K.A. Mueller, S.M. Marjanishvili. A streamlined framework for calculating the response of steel-supported bridges to open-air tanker truck fires. *Fire Safety Journal*, 73 (2015) 63-65.

- [6] I. Payá-Zaforteza and MEM Garlock (2012). A numerical investigation on the fire response of a steel girder bridge. *Journal of Constructional Steel Research* 75 (2012) 93–103.
- [7] W. Wright, B. Lattimer, M. Woodworth, M. Nahid, and E. Sotelino. Highway bridge fire assessment draft final report. NCHRP Program Transportation Research Board of the National Academies. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA; 2013.
- [8] J Alos-Moya, I Paya-Zaforteza, MEM Garlock, E Loma-Ossorio, D Schiffner, A Hospitaler. Analysis of a bridge failure due to fire using computational fluid dynamics and finite element models. *Engineering Structures*, 68 (2014) 96-110.
- [9] G Peris-Sayol, J Alós-Moya, I Payá-Zaforteza, A Hospitaler-Pérez. A parametric study on the thermo-mechanical response of a multi-girder steel bridge submitted to real fires (Estudio paramétrico de la respuesta termo-estructural de un puente metálico multijácena sometido a incendios reales). *Informes de la Construcción*, 66 (Nº Extra-1) (2014). 1-11.
- [10] X. Gong, A.K. Agrawal. Numerical Simulation of Fire Damage to a Long-Span Truss Bridge. *Journal Bridge Engineering*, 20(10) (2015).
- [11] G. Peris-Sayol, I. Paya-Zaforteza, J. Alos-Moya, A. Hospitaler. Analysis of the influence of geometric, modeling and environmental parameters on the fire response of steel bridges subjected to realistic fire scenarios. *Computers and Structures*, 158 (2015) 333-345.
- [12] X. Gong, AK Agrawal. Safety of Cable-Supported Bridges during Fire Hazards. *Journal of Bridge Engineering*, 21(4) (2016).
- [13] J. Glassman, MEM Garlock, E. Aziz and V. Kodur. Modeling parameters for predicting the postbuckling shear strength of steel plate girders. *Journal of Constructional Steel Research*, 121 (2016). 136-143.
- [14] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 1 Actions on Structures, Part 2: Traffic loads on bridges. Brussels (Belgium): CEN; 2003.
- [15] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 1 Actions on Structures, Part 1-2: General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire. Brussels (Belgium): CEN; 2002.
- [16] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels, (Belgium): CEN; 2005
- [17] J Alos-Moya, I Paya-Zaforteza, A Hospitaler, E Loma-Ossorio. Valencia bridge fire tests: Validation of simplified and advanced numerical approaches to model bridge fire scenarios. *Advances in Engineering Software* 128 (2019) 55-68.
- [18] D. Drysdale. An Introduction to Fire Dynamics. John Wiley and Sons. United Kingdom. 2011.
- [19] P. Rinaudo, B. Torres, I. Paya-Zaforteza, PA Calderón, S Sales. Evaluation of new regenerated fiber Bragg grating high-temperature sensors in an ISO 834 fire test. *Fire Safety Journal*, 71 (2015) 332-339
- [20] P. Rinaudo, I. Paya-Zaforteza, P. Calderón, S. Sales. Experimental and analytical evaluation of the response time of high temperature fiber optic sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 243 (2016). 167-174