

Propuesta de curvas de fuego paramétricas para incendios bajo puentes con tableros multijácena. Aplicación a un paso superior mixto.

*Proposal of parametric fire curves for under deck fires for multiple girder bridges.
Application to a composite deck bridge.*

Jethro David Howard^a, Ignacio Paya-Zaforteza^b y Guillem Peris-Sayol^c

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de València. Estudiante de doctorado. jetho@upv.es

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de València - ICITECH. Catedrático de Universidad. igpaza@upv.es

^cDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Pontificia Comillas. Profesor a tiempo parcial. gperis@icai.comillas.edu

RESUMEN

Esta comunicación resume el desarrollo de curvas de fuego paramétricas para puentes con tableros multijácena, que eliminan la necesidad de modelos complejos de dinámica de fluidos computacional (CFD). Estas curvas dependen de parámetros que definen la configuración del puente y la carga de fuego, y proporcionan las temperaturas superficiales adiabáticas (AST) a lo largo del tablero. Se han derivado de 64 modelos CFD utilizando análisis ANOVA y regresión lineal múltiple para obtener ecuaciones lineales sencillas. Se aplican a un paso superior mixto, mostrando que las diferencias de AST obtenidas frente a modelos CFD tienen un efecto despreciable en la respuesta mecánica del puente.

ABSTRACT

This communication summarizes the development of parametric fire curves for multiple girder bridges, which eliminate the need for complex computational fluid dynamics (CFD) models. These curves depend on parameters that define the bridge configuration and fire load, and they provide the adiabatic surface temperatures (AST) all along the deck. They have been derived from 64 CFD models using ANOVA analysis and multiple linear regression to obtain simple linear equations. They are applied to a composite deck bridge, showing that the differences in AST obtained compared to CFD models have a negligible effect on the mechanical response of the bridge.

PALABRAS CLAVE: fuego, puentes multijácena, CFD, curvas paramétricas de fuego.

KEYWORDS: fire, multiple girder bridges, CFD, parametric fire curves.

1. Introducción

Los incendios en puentes son preocupantes por sus consecuencias sociales y económicas y por la ausencia de normas para evaluar el problema [1–3]. Esta evaluación necesita tres tipos de modelos: de incendio, térmico y estructural. Por tanto, el primer paso en la evaluación siempre es

construir un modelo de incendio que proporcione los flujos de calor que inciden sobre la estructura. Los modelos de incendio más avanzados emplean técnicas CFD y, aunque pueden ser muy precisos, también son muy complejos [4–7].

En este contexto, esta comunicación resume el desarrollo de unas curvas de fuego paramétricas para puentes con tableros multijácena con vigas en doble T sometidos a incendios de camión cisterna bajo tablero [8], que sirven como sustitución a los modelos de incendio más avanzados.

Finalmente, se desarrolla un caso de aplicación de un paso superior con un tablero mixto multijácena sometido a distintos escenarios de incendio.

2. Patrón general de las curvas paramétricas

Las curvas de incendio son expresiones matemáticas que representan la evolución temporal de las acciones térmicas que inciden sobre una estructura durante un incendio y combinan, en una única temperatura, los efectos de la convección y la radiación.

En el caso de puentes sometidos a incendios de camión cisterna bajo tablero, las temperaturas experimentan variaciones significativas a lo largo del eje del puente [4,6,9].

Por tanto, las vigas se dividen en segmentos longitudinales (Figura 1a), y en cada segmento, se introducen dos patrones de calentamiento diferentes: uno para el ala inferior y otra para la losa superior, el ala superior y el alma (Figura 1b).

Las curvas paramétricas se expresan en términos de temperaturas adiabáticas [9], que permite: 1) transformar las acciones térmicas por radiación y convección que inciden sobre la superficie del puente en una temperatura equivalente del gas adyacente a dicha superficie; 2) la introducción de los resultados del modelo de incendio en el modelo termomecánico. Además, las temperaturas adiabáticas son independientes del material, y, por tanto, pueden aplicarse indistintamente a tableros de acero, de hormigón o mixtos.

Las curvas de fuego propuestas incorporan una fase de crecimiento (basada en una curva de fuego ultrarrápida) seguida de una fase de combustión constante (ver Figura 1c). No es necesario definir una fase de decaimiento porque, normalmente, los bomberos llegan al lugar del incendio o el puente se derrumba antes de que las temperaturas empiecen a descender debido al consumo de combustible [8].

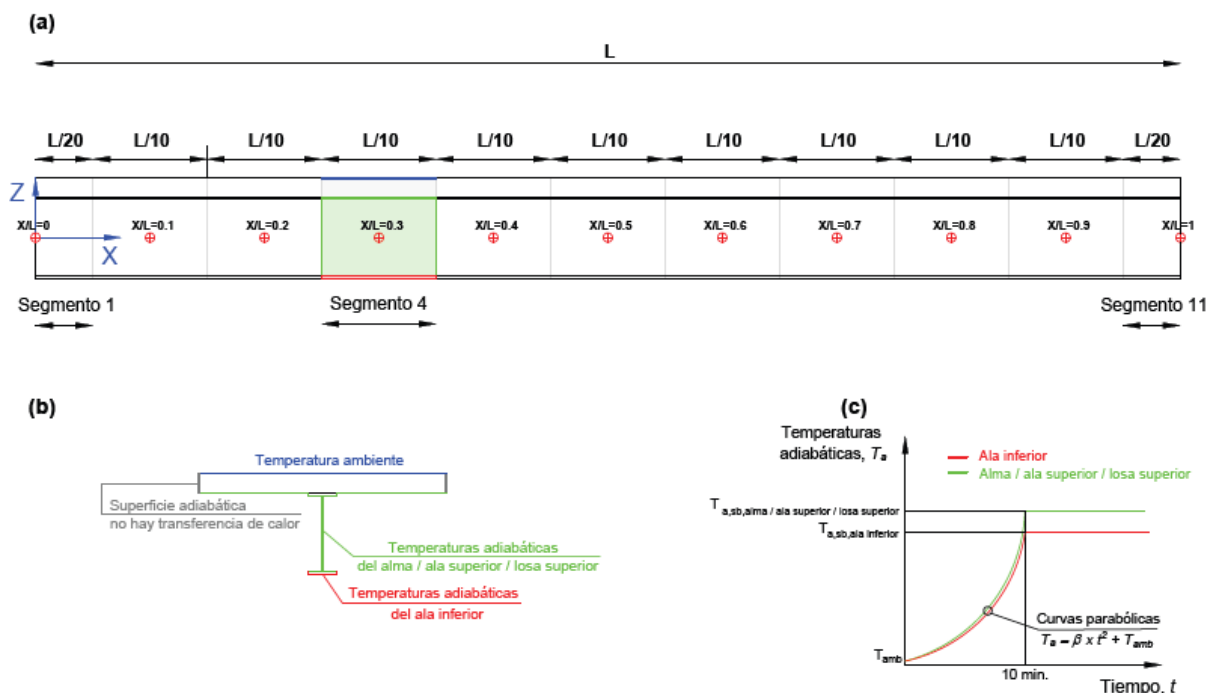


Figura 1. (a) División de una viga típica en segmentos. Los colores del segmento 4 representan distintas condiciones de contorno térmicas. (b) Condiciones de contorno térmicas aplicadas en cada segmento de viga. (c) Forma genérica de las curvas de fuego paramétricas propuestas [8].

3. Obtención de las temperaturas adiabáticas estacionarias ($T_{a, sb}$)

A continuación, se resume el proceso seguido para desarrollar unas ecuaciones lineales sencillas expresables matricialmente que sirven para obtener estas temperaturas adiabáticas estacionarias ($T_{a, sb}$).

3.1 Diseño de experimentos

En el diseño de experimentos se definieron tanto los parámetros que deben considerarse (ver Figura 2), como el número de configuraciones necesarias (64) para garantizar la significación estadística de los resultados obtenidos.

Tabla 1. Valores de parámetros considerados [8].

Parámetro	Umbral inferior	Umbral superior
Configuración subestructura	Pilas abiertas	Estribos cerrados
Ancho tablero (m)	13	23.4
Luz vano (m)	16	24
Gálibo (m)	5	9
HRR (kW/m ²)	1800	2400

Se consideraron un total de cinco parámetros para caracterizar $T_{a, sb}$: cuatro dependen de la configuración del puente (tipo de subestructura, ancho del tablero, luz de vano y gálibo), mientras que el quinto parámetro la tasa de liberación de calor (HRR). En la Tabla 1 se especifican los valores considerados para cada parámetro.

Aunque la posición del camión cisterna (bajo el centro del vano o adyacente al estribo/pilar) podría considerarse como un sexto parámetro, se ha optado por desarrollar ecuaciones independientes para cada posición, para simplificar las expresiones obtenidas.

3.2 Análisis CFD

Se obtienen las temperaturas adiabáticas estacionarias ($T_{a, sb}$) del ala inferior y alma para cada una de las 64 configuraciones utilizando modelos CFD ejecutados con el software Fire Dynamics Simulator (FDS) [10], versión 6.6.0, en el clúster de cálculo *Rigel* de la Universitat Politècnica de València (UPV).

Este software ha sido validado previamente para incendios bajo puentes mediante estudios numéricos [6,11] y con experimentos llevados a cabo sobre un puente construido en el campus de la UPV [12,13].

Tabla 2. Detalles de los modelos FDS [8].

Volumen de control	$X \in [34, 58]$ m; $Y \in [30, 46]$ m; $Z \in [12, 18]$ m
Tamaño de celda	0.20 x 0.20 x 0.20 m
Escenario de incendio	Área de incendio: superficie horizontal de 28.8 m ² (12.2 x 2.4 m) ubicado 1 m sobre el firme. Rendimiento CO: 0.019. Rendimiento de hollín: 0.059.
Condiciones de contorno	Superficies adiabáticas: superestructura (vigas doble T y losa superior). Superficies no adiabáticas: subestructuras (pilas y/o estribos). Ubicados cada 0.2 m a lo largo de la viga doble T central, en el centro del ala inferior y a cada lado del centro del alma.
Sensores	

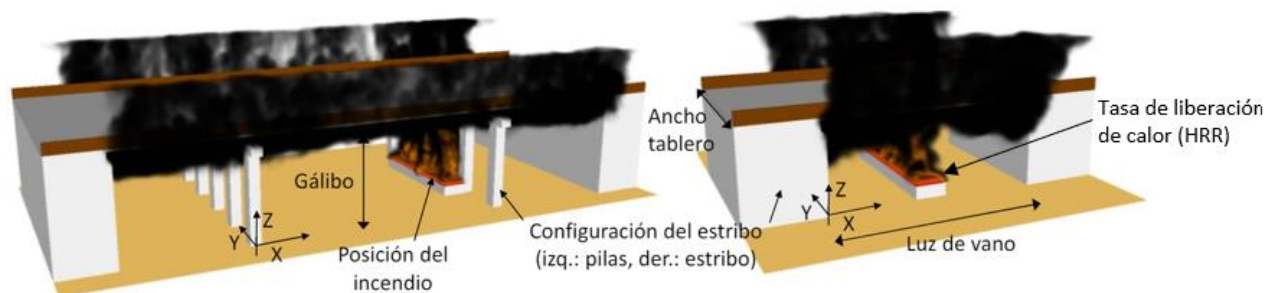


Figura 2. Definición gráfica de los parámetros utilizados en el desarrollo de las curvas de fuego [8].

3.3 Análisis estadístico

Las temperaturas adiabáticas estacionarias ($T_{a, sb}$) obtenidas se analizan mediante el empleo de modelos ANOVA para obtener la significación estadística de cada parámetro considerado.

Los parámetros (y las interacciones) que tienen un efecto significativo sobre las temperaturas adiabáticas estacionarias se utilizan para desarrollar modelos predictivos para las temperaturas adiabáticas utilizando modelos de regresión lineal múltiple.

3.4 Propuesta de ecuaciones y validación

La combinación de estos modelos predictivos, en forma de ecuaciones lineales sencillas, expresables matricialmente, permiten obtener las temperaturas adiabáticas estacionarias ($T_{a, sb}$) tanto para el ala inferior y para el alma/ala superior/losa superior para cada uno de los segmentos/posición relativa (X/L) en los que se divide la viga (ver Figura 1a).

Las ecuaciones propuestas se validaron mediante una comparación con modelos CFD utilizando tanto las 64 configuraciones iniciales como nuevas configuraciones con valores de parámetros dentro y fuera de rango inicialmente estudiado [8].

4. Caso de aplicación

En este apartado, las curvas de fuego paramétricas se aplican a un puente existente sobre la carretera *U.S. Route 1*, a su paso por Trenton, Nueva Jersey, EE.UU., comparando las temperaturas adiabáticas estacionarias obtenidas a partir de las curvas con las medidas en los correspondientes modelos CFD desarrollados para el presente caso de estudio.

4.1 Descripción del puente

El puente seleccionado es un paso superior que permite que *Broad Street* cruce sobre la carretera

U.S. Route 1 en la ciudad de Trenton (NJ, EE.UU.), y está situado a aproximadamente 700 metros en dirección norte del puente *Delaware River Joint Toll Bridge*. Las coordenadas geográficas son 40°12'49.9"N 74°45'36.3"W.

El paso superior está configurado con cuatro carriles para tráfico rodado (dos en cada sentido) y dos aceras peatonales, mientras que debajo del puente discurren otros cuatro carriles de tráfico rodado (dos en cada sentido).

Según el informe resumido del *National Bridge Inventory (NBI)* de 2023 [14], el puente tiene una luz principal de 23.4 metros (77 pies), un ancho de 21.8 metros (71.5 pies) y un gálibo de 5.2 metros (17 pies). Se construyó en 1952 y es propiedad privada de la *State Toll Authority*.

La superestructura está compuesta por 13 vigas doble T de acero laminado, con secciones transversales y separaciones distintas para el tramo central (7 vigas), que soporta los cuatro carriles de tráfico rodado, y tramos laterales (3+3 vigas), que soportan las aceras peatonales.

Para el presente caso de aplicación, se va a realizar la comparación utilizando la viga central del tramo central del paso superior, y, por tanto, no es necesario proporcionar más información sobre la sección transversal de las vigas de los tramos laterales.

Para las vigas del tramo central, la separación aproximada es de 2 metros (6.5 pies) entre cada viga (medida entre ejes). Hay un total de 5 diafragmas/vigas transversales, ubicados en cada extremo del vano y en los tres cuartiles longitudinales, con una separación de 5.75 metros (18.9 pies). Estas vigas doble T de acero laminado soportan una losa de hormigón.

Las subestructuras del paso superior son dos estribos verticales de hormigón situados a ambos extremos de la superestructura, sobre los que se apoyan las vigas doble T. En el caso de las vigas de los tramos laterales, existe un recrecido para elevar el plano de apoyo de las vigas, dado que son de menor canto que los del tramo central.

Las secciones transversales de las vigas doble T del tramo central del paso superior se han estimado en función de la luz del puente y de las recomendaciones de diseño publicadas por la *Federal Highway Administration (FHWA)* en 1982, con el título “*Standard plans for Highway Bridges: Volume II (Structural Steel Superstructures)*” [15]. Este documento incluye diseños de diferentes tipos de puentes en función de su luz y configuración, proporcionando las dimensiones de las vigas doble T y del tablero de hormigón, así como su armado. En este caso se toma de referencia un paso superior mixto de vigas laminados en caliente con 24.4 metros de luz y 2 metros de separación transversal entre vigas similar al puente del presente caso de estudio (23.4 metros de luz y 2 metros de separación transversal).

La viga de acero laminado en caliente indicada en las recomendaciones de diseño de la FHWA es el perfil: W36x280 (canto en pulgadas x peso en libras por pie), siendo el equivalente métrico el perfil W920x420x417 (canto en milímetros x ancho en milímetros x peso en kilogramos por metro). Se considera que el material es acero ASTM A36, con un límite elástico mínimo de 36000 psi (250 MPa). La viga doble T seleccionada no requiere una chapa de refuerzo para el ala inferior (“*Non-Cover Plated Beam*”), y aunque se proporciona el espaciado máximo de los conectores de cortante, no es necesario para los modelos utilizados en este estudio. El canto de la losa de hormigón es de 20 centímetros, con una resistencia característica a compresión a 28 días de 4500 psi (31 MPa).

El número y la posición de diafragmas/vigas transversales no tiene un efecto significativo en la distribución longitudinal de las temperaturas adiabáticas [8] y, por tanto, no se tienen en cuenta en este caso de estudio.

4.2 Comparación de las curvas de fuego

Para el paso superior objeto de este caso de estudio, las dimensiones del puente (gálibo, luz

de vano y ancho de tablero), así como la configuración de la subestructura (estribos) son parámetros fijos, y por lo tanto los únicos parámetros que se pueden variar para estudiar diferentes escenarios de incendio son los relacionados con la posición del incendio (adyacente a un estribo o en el centro del vano) y la tasa de liberación de calor (HRR, *Heat Release Rate*).

La configuración de los modelos CFD, incluida la definición de los volúmenes de control, la malla, la geometría, las propiedades de los materiales (superestructura adiabática, subestructura no adiabática), el foco del incendio, el modelo de combustión y los sensores es la misma que para los 64 modelos CFD utilizados para determinar las curvas de fuego paramétricas (ver Tabla 2).

Tabla 3. Configuraciones de los modelos FDS para los escenarios del caso de aplicación.

Modelo	Posición	HRR (kW/m²)
Trenton 1	Adyacente a un estribo	2400
Trenton 2	Centro de vano	2400
Trenton 3	Adyacente a un estribo	1800
Trenton 4	Centro de vano	1800

En la Tabla 3, se definen las configuraciones de escenarios de incendio a analizar, con los valores de los parámetros independientes que pueden variar. Para el resto de los parámetros independientes, sus valores son fijos para todos los escenarios: gálibo 5.2 metros; luz de vano 23.4 metros; ancho de tablero 21.8 metros; y las subestructuras son estribos.

En la Figura 3, se muestran las distribuciones de temperaturas adiabáticas estacionarias ($T_{a, sb}$) obtenidas con las curvas de fuego paramétricas con las medidas en los correspondientes modelos CFD, para cada uno de los cuatro escenarios definidas en la Tabla 3, tanto para el ala inferior como para el alma/ala superior/losa superior.

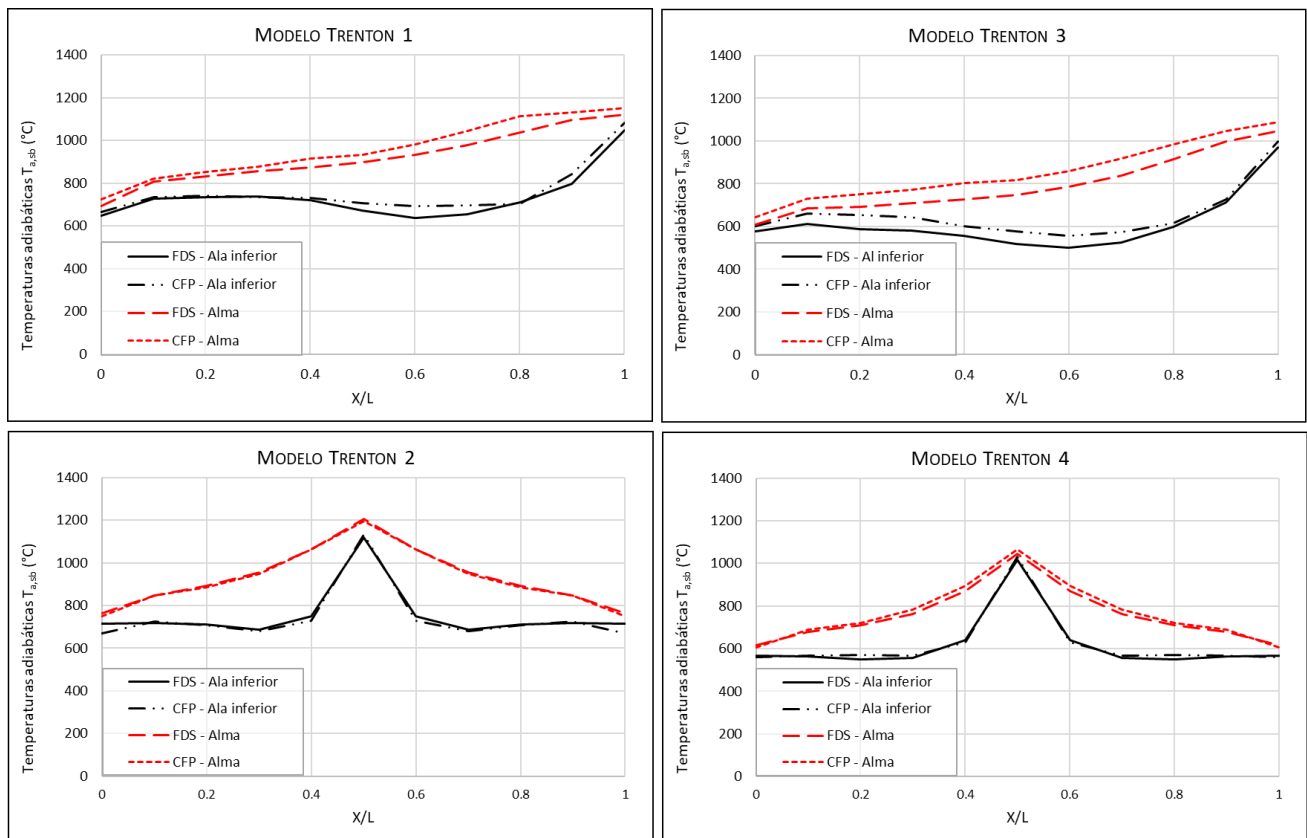


Figura 3. Comparación de las temperaturas adiabáticas estacionarias ($T_{a, sb}$) obtenidas de las curvas de fuego paramétricas (CFP) y de modelos CFD (FDS) para los escenarios de incendio del caso de estudio.

De forma general, las distribuciones obtenidas mediante ambos métodos son muy parecidas, especialmente en el caso de los escenarios Trenton 2 y Trenton 4, con el incendio en la posición de centro de vano.

Para los escenarios Trenton 1 y Trenton 3, con el incendio en la posición adyacente a un estribo, se observa una ligera sobreestimación de las temperaturas adiabáticas estacionarias ($T_{a, sb}$) de las curvas de fuego paramétricas con respecto a los correspondientes modelos CFD, con una desviación máxima de aproximadamente 50°C y 75°C en el caso del ala inferior y alma/ala superior/losa superior respectivamente.

Debido a la naturaleza similar de las curvas de temperaturas adiabáticas estacionarias ($T_{a, sb}$) entre los modelos con diferentes tasas de liberación de calor (HRR), sólo los modelos Trenton 1 y Trenton 2 (correspondientes con la HRR más alta, 2400 kW/m²) serán estudiados utilizando un análisis termomecánico, con el fin

de determinar el efecto de la diferencia de temperaturas adiabáticas estacionarias ($T_{a, sb}$) entre las curvas de fuego paramétricas y los modelos CFD sobre la respuesta termomecánica de la viga doble T central del paso superior objeto del caso de estudio.

4.3 Análisis termomecánico

La respuesta termomecánica del puente se obtiene con SAFIR (versión 2019.a.2), desarrollado en la *Université de Liège* y en la *Johns Hopkins University* [16]. Este software fue escrito específicamente para la modelización del comportamiento de estructuras sometidas a fuego. Desarrollado utilizando el lenguaje de programación FORTRAN, el software permite realizar modelos bidimensionales y tridimensionales, utilizando el método de los elementos finitos (MEF) para encontrar soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales parciales complejas.

La respuesta se calcula en dos pasos: en el primero, se llevan a cabo los análisis de transferencia de calor utilizando las temperaturas adiabáticas estacionarias e incorporando una fase de crecimiento basada en una curva de fuego ultrarrápida, que permiten obtener la evolución de la temperatura de la sección transversal de la viga central (viga doble T y tablero de hormigón) en cada posición relativa a lo largo del vano (X/L) teniendo en cuenta las propiedades de conductividad térmica de los materiales; en el segundo, se utilizan los resultados de los análisis anteriores para realizar un análisis mecánico iterativo, utilizando las propiedades modificadas de los materiales para cada paso temporal correspondiente a las temperaturas calculadas.

4.3.1. Definición de la sección transversal

La sección transversal de la viga doble T central del puente se define como un perfil W36x280 de acero ASTM A36, con un límite elástico mínimo de 36000 psi (250 MPa), mientras que la losa de hormigón se define con un canto de 20 centímetros y un ancho de 2 metros (para el presente caso de aplicación, se desprecian los posibles efectos del arrastre de cortante), con una resistencia característica a compresión de 4500 psi (31 MPa).

El programa incluye los modelos predefinidos de los Eurocódigos para el hormigón (EN 1992-1-2) y acero (EN 1993-1-2), que incluyen la definición del calor específico, la conductividad térmica, la expansión térmica y las ecuaciones constitutivas de los materiales. Para este caso de aplicación, se han empleado los modelos SILCON_ETC y STEELEC3EN para el hormigón y acero respectivamente [17].

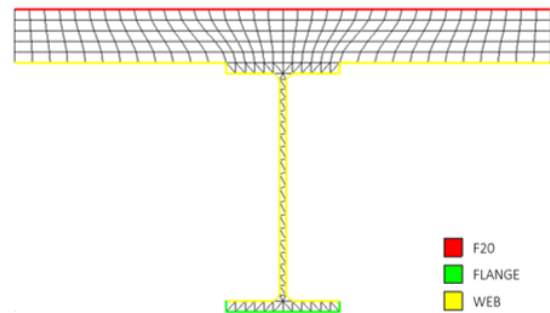


Figura 4. Condiciones de contorno térmicas.

4.3.2. Análisis de transferencia de calor

En la Figura 4 se muestran las condiciones de contorno térmicas asignadas, con la designación del ala inferior (solo la cara inferior y caras laterales) en verde, el alma (incluyendo la cara superior del ala inferior) y caras inferiores del ala superior y losa en amarillo y la cara superior de la losa en rojo (a temperatura ambiente de 20°C).

Cada una de estas condiciones de contorno corresponde a una temperatura adiabática estacionaria y su correspondiente fase de crecimiento, siendo distintos para cada posición relativa de la sección transversal en el vano del puente (X/L) y para los dos escenarios a analizar de la Tabla 3 (Trenton 1 y Trenton 2).

En estos contornos es donde se producirá la transferencia de calor entre la sección transversal y las temperaturas adiabáticas definidas previamente, en función de las propiedades de conductividad térmica de los materiales.

En el caso de los laterales de la losa superior, dado que no hay transferencia de calor a través de un plano de simetría, no es necesario definir condiciones de contorno térmicas.



Figura 5. Muestra de resultados del análisis de transferencia de calor para el escenario Trenton 2 utilizando las temperaturas adiabáticas obtenidas con las curvas de fuego paramétricas para la posición relativa $X/L = 0.5$.

4.3.3. Análisis mecánico

Una vez realizados los análisis de transferencia de calor, se combinan en un modelo mecánico por cada escenario de incendio (Trenton 1 y Trenton 2), para las temperaturas adiabáticas obtenidas a partir de las curvas de fuego paramétricas (CFP) y los modelos CFD (FDS).

Estos modelos mecánicos están formados por elementos tipo barra, discretizados en función de las posiciones relativas X/L para los cuáles se han obtenido las temperaturas adiabáticas: para las posiciones $X/L = 0$ y $X/L = 1$ se discretizan elementos de longitud $1/20L$ en cada extremo, mientras que para el resto de las posiciones relativas de $X/L = 0.1$ a $X/L = 0.9$, se discretizan elementos de longitud $1/10L$, centradas en sus correspondientes posiciones relativas (ver Figura 1a).

Por tanto, cada modelo mecánico está formado por un total de 11 modelos diferentes de transferencia de calor (aunque en el caso de los incendios posicionados en centro-luz como el escenario Trenton 2, se reducen a 6 al considerarse una distribución simétrica a ambos lados del foco de incendio).

Las cargas consideradas durante el análisis mecánico son el peso propio de la viga doble T, 4.17 kN/m, el peso propio del tablero de hormigón (0.2 x 2 metros), 10 kN/m y la carga muerta del pavimento, 3,22 kN/m. Las sobrecargas correspondientes al tráfico no se han incluido en el análisis, ya que no tienen un efecto significativo en la respuesta mecánica de la estructura durante un incendio [5–7].

Finalmente, para el presente caso de aplicación se considera que la viga central esta biapoyada en ambos extremos, donde un apoyo es de tipo fijo y el otro es de tipo móvil, permitiendo el desplazamiento longitudinal libre. En la realidad la expansión máxima de las vigas del puente debe ser limitada, ya que estas vigas no pueden expandirse ilimitadamente debido a la existencia de los estribos [5–7], pero no se considera necesario para realizar la

comparación entre las respuestas termomecánicas relativas entre las temperaturas adiabáticas obtenidas a partir de las curvas de fuego paramétricas (CFP) y los modelos CFD (FDS) respectivamente.

4.3.4. Valoración del fallo

Se han considerado como criterios de fallo que la estructura se vuelva inestable debido a un aumento drástico de la velocidad de la flecha en centro-luz (limitado a $L/20$, equivalente a 1.17 metros para el vano de 23.4 metros del caso de aplicación) o a un movimiento hacia el centro del vano del apoyo móvil [5].

4.3.5. Resultados

En la Figura 6 se muestra un extracto de los resultados del análisis termomecánico, incluyendo la evolución de la flecha en centro-luz y el desplazamiento horizontal del apoyo móvil para los escenarios de incendios Trenton 1 y Trenton 2, utilizando las temperaturas adiabáticas obtenidas de las curvas de fuego paramétricas (CFP) y de modelos CFD (FDS).

En la Tabla 4 se resume, para cada escenario, el criterio de fallo alcanzado en primer lugar, y el tiempo transcurrido hasta alcanzar el fallo.

Tabla 4. Criterios y tiempos de fallo de los escenarios de incendio del caso de aplicación.

Modelo	Criterio de fallo ¹	Tiempo (min)
Trenton 1 - FDS	DH	26
Trenton 1 - CFP	DH	22
Trenton 2 - FDS	F; DH	16
Trenton 2 - CFP	F; DH	16

¹ F: flecha equivalente a $L/20$ alcanzado; DH: inestabilidad por el movimiento hacia el centro del vano del apoyo móvil.

Para el escenario Trenton 2, dado que en la comparación de temperaturas adiabáticas estacionarias ya se observó que las distribuciones eran prácticamente idénticas, era de esperar que la respuesta termomecánica también lo fuese.

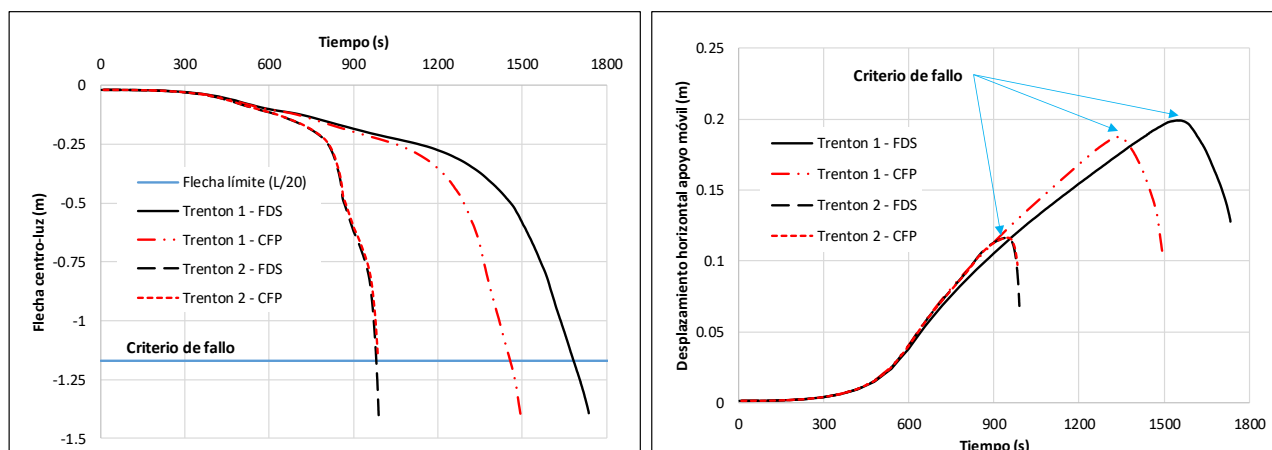


Figura 6. Evolución de la flecha en centro-luz (izq.) y del desplazamiento horizontal del apoyo móvil (dcha.) para los escenarios de incendio Trenton 1 y Trenton 2, utilizando las temperaturas adiabáticas obtenidas de las curvas de fuego paramétricas (CFP) y de modelos CFD (FDS).

En el caso del escenario Trenton 1, los resultados muestran que las evoluciones de la flecha en centro-luz y el desplazamiento horizontal del apoyo móvil para los modelos FDS y CFP son muy similares, aunque el modelo CFP alcanza antes el umbral de fallo para ambos criterios. Esto es coherente con la comparación de temperaturas adiabáticas estacionarias en la Figura 3, donde se observó una ligera sobreestimación de temperaturas (50 - 75 °C) obtenidas con las CFP frente a los modelos FDS.

5. Conclusiones

Esta comunicación resume el desarrollo de curvas de fuego paramétricas para incendios bajo puentes con tableros multijácena. Estas curvas incorporan una fase de crecimiento basada en una curva de fuego ultrarrápida, seguida de una fase de combustión constante, y captan la naturaleza evolutiva de los incendios sin necesidad de complejos cálculos CFD. Además, las curvas se expresan en términos de temperaturas adiabáticas y, por tanto, son válidas para puentes con tableros contruidos con distintos materiales.

Las curvas paramétricas se presentan como expresiones matemáticas sencillas, y en [8] se proporciona como material complementario una hoja de cálculo Excel para obtener

directamente los valores de las temperaturas adiabáticas estacionarias y los parámetros de la fase de crecimiento de las curvas de fuego.

Finalmente, el caso de aplicación muestra pequeñas diferencias entre las temperaturas adiabáticas utilizadas puede afectar los tiempos de fallo obtenidos en un análisis termomecánico de un puente. Al igual que con otros tipos de acciones, se propone el desarrollo de unos factores de seguridad para garantizar que el uso de las curvas de fuego paramétricas sea conservador con respecto a los análisis CFD y el comportamiento real de los incendios.

Referencias

- [1] G. Peris-Sayol, I. Paya-Zaforteza, S. Balasch-Parisi, J. Alós-Moya, Detailed Analysis of the Causes of Bridge Fires and Their Associated Damage Levels, *Journal of Performance of Constructed Facilities* 31 (2017).
- [2] M. Garlock, I. Paya-Zaforteza, V. Kodur, L. Gu, Fire hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies, *Eng Struct* 35 (2012) 89–98.
- [3] Z. Liu, G.Q. Li, I. Paya-Zaforteza, C.S. Cai, Q. Huang, Fire Hazards in Bridges: State of the Art, Recent Progress, and Current Research Gaps, *Journal of Bridge Engineering* 28 (2023).

- [4] J. Choi, Concurrent fire dynamics models and thermomechanical analysis of steel and concrete structures, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, USA, 2008.
- [5] I. Payá-Zaforteza, M.E.M. Garlock, A numerical investigation on the fire response of a steel girder bridge, *J Constr Steel Res* 75 (2012) 93–103.
- [6] J. Alos-Moya, I. Paya-Zaforteza, M.E.M. Garlock, E. Loma-Ossorio, D. Schiffner, A. Hospitaler, Analysis of a bridge failure due to fire using computational fluid dynamics and finite element models, *Eng Struct* 68 (2014) 96–110.
- [7] 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, *Comput Struct* 158 (2015) 333–345.
- [8] J.D. Howard, I. Paya-Zaforteza, G. Peris-Sayol, Parametric fire curves for I-girder bridges submitted to under deck tanker fires, *Eng Struct* 306 (2024) 117810.
- [9] U. Wickström, D. Duthinh, K. McGrattan, Adiabatic Surface Temperature for Calculating Heat Transfer to Fire Exposed Structures, 11th International Interflam Conference, London, England, 2007: pp. 943–953.
- [10] K. McGrattan, R. McDermott, C. Weinschenk, K. Overholt, S. Hostikka, J. Floyd, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model, Gaithersburg, MD, 2013.
- [11] J.J. Pagán-Martínez, I. Paya-Zaforteza, A. Hospitaler-Pérez, Post-fire assessment of composite steel-concrete box-girder bridges: Lessons from a recent incident, *J Constr Steel Res* 214 (2024) 108425.
- [12] J. Alos-Moya, I. Paya-Zaforteza, A. Hospitaler, P. Rinaudo, Valencia bridge fire tests: Experimental study of a composite bridge under fire, *J Constr Steel Res* 138 (2017) 538–554.
- [13] 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.
- [14] US Department of Transportation FHWA. National Bridge Inventory (NBI), Bridge Summary Report. Structure Number 3300027., 2023.
- [15] US Department of Transportation FHWA, Standard Plans for Highway Bridges. Volume II, 1982.
- [16] J.-M. Franssen, T. Gernay, Modeling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities, *Journal of Structural Fire Engineering* 8 (2017) 300–323.
- [17] J.M. Franssen, T. Gernay, User's manual for SAFIR 2022. A computer program for analysis of structures subjected to fire. Part 5: Material properties, Liege University. Urban & Environmental Engineering. Structural Engineering, 2022.