



5.^{os} JORNINC

Jornadas de Segurança
aos Incêndios Urbanos

Lisboa • LNEC • 1 e 2 de junho de 2016



ESTUDIO ANALÍTICO DE LA INESTABILIDAD POR PANDEO LATERAL DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS EXPUESTAS A FUEGO ISO834



A.B. Ramos-Gavilán*
Profesora
U.Salamanca- Spain



Paulo Piloto
Profesor
IPB - Bragança



Luís Mesquita
Profesor
IPB - Bragança

RESUMEN

En base a un modelo de elementos finitos (EF) capaz de simular el comportamiento de las vigas analizadas en el trabajo de Piloto et al. [1], este estudio aborda el análisis numérico de vigas parcialmente embebidas (VPE) generadas en base a un perfil IPE100, sometidas a flexión en tres puntos y expuestas a fuego normalizado ISO834 [2]. El resultado numérico del instante de inestabilidad por pandeo lateral (PL) y de fallo según la norma UNE-EN 1363-1:2015 [3], sirve de base para valorar el ajuste del resultado analítico de resistencia a flexión de VPE considerando inestabilidad por PL, obtenido a través de un procedimiento de cálculo que adapta la formulación de la norma UNE-EN 1993-1-2:2011 [4] a las VPE.

PALABRAS CLAVE: Pandeo lateral; viga parcialmente embebida; resistencia a fuego.

1. INTRODUCCIÓN

Las VPE son elementos mixtos que aumentan la masividad de perfiles de acero I o H a través del hormigonado de los espacios existentes entre sus alas, mejorando la capacidad portante y la rigidez a torsión y flexión entorno al eje débil de la sección y, por lo tanto, la resistencia a PL.

La norma UNE-EN 1994-1-1:2013 [5] aporta criterios de diseño y cálculo a flexión a temperatura ambiente, que incluye la verificación de la inestabilidad por PL en base al procedimiento recogido en la norma UNE-EN 1993-1-1:2008 [6]. Por su parte, la norma UNE-EN 1994-1-2:2011 [7] ofrece valores tabulados y modelos de cálculo simplificado de la

* Autor correspondiente – Universidad de Salamanca, Departamento de Ingeniería Mecánica, Avda. Requejo, 33, 49022 Zamora, España.
email: aramos@usal.es <http://www.usal.es>

resistencia a fuego (RF) de vigas mixtas. Estos métodos relacionan la RF con el nivel de carga, la geometría del perfil y el área de la armadura del hormigón, que compensa la pérdida de resistencia del ala inferior del perfil. Sin embargo, esta norma no considera la verificación de la resistencia a PL de VPE no arriostradas en situación de incendio.

En base a un modelo tridimensional de EF capaz de simular el comportamiento de las VPE analizadas en el trabajo de Piloto et al. [1], definidas gráficamente en la figura 1, se realiza un estudio numérico de vigas con idéntica geometría y materiales que los empleados en el estudio experimental, sometidas a flexión en tres puntos con distintos niveles de carga y expuestas a fuego normalizado [2], empleando para ello los valores de emisividad y coeficiente de convección recogidos en la norma UNE-EN 1994-1-2:2011 [7].

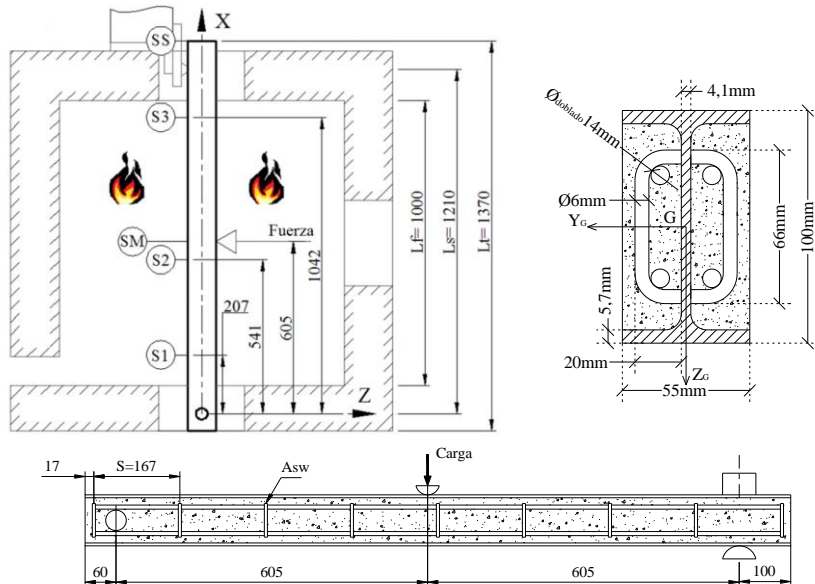


Figura 1: Esquema del ensayo y descripción de las probetas del estudio experimental [4]

El resultado numérico del instante en que la viga sufre inestabilidad por PL y el resultado numérico del instante de fallo según la norma UNE-EN 1363-1:2015 [3] sirven para verificar el resultado analítico de resistencia a flexión de VPE considerando inestabilidad por PL, obtenido a través del procedimiento de cálculo propuesto en este estudio.

2. ESTUDIO ANALÍTICO DE LA RESISTENCIA A PL DE VPE EN SITUACIÓN DE INCENDIO

2.1 Resistencia a PL de VPE en situación de incendio

Para determinar la resistencia de cálculo a PL de VPE no arriostradas en situación de incendio en el instante t , $M_{b,fi,t,Rd}$, se propone adaptar la formulación de la norma UNE-EN 1993-1-2:2011 [4] a las VPE, a través de la expresión (1), donde $\chi_{LT,fi}$ es el coeficiente de reducción a PL para

el dimensionamiento en situación de incendio, y $M_{fi,t,Rd}$ es el momento resistente de la sección homogeneizada en el instante de exposición t .

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \cdot M_{fi,t,Rd} \quad (1)$$

El momento $M_{fi,t,Rd}$ de la sección parcialmente embebida se determina empleando el procedimiento recogido en la norma UNE-EN 1994-1-2:2011 [7], estableciendo el equilibrio axial, representado en la figura 2, que responde a la expresión (2), donde $z_{pl,fi,t}$ es la profundidad de la fibra neutra en el instante t , determinada a través de la ecuación (3).

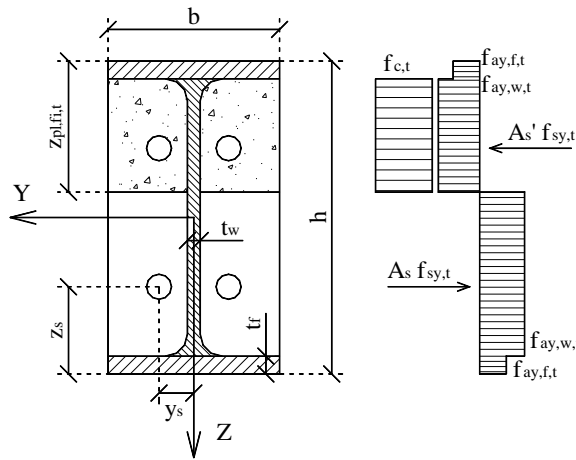


Figura 2: Distribución de tensiones en VPE para el cálculo del momento resistente $M_{fi,t,Rd}$

$$M_{fi,t,Rd} = W_{pl,y} f_{ay,w,t} - 2 \cdot \left[t_w \left(\frac{h}{2} - z_{pl,fi,t} \right)^2 \frac{1}{2} f_{ay,w,t} \right] + 2 A_s f_{sy,t} \cdot \left(\frac{h}{2} - z_s \right) + (z_{pl,fi,t} - t_f) \cdot (b - t_w) \cdot f_{c,t} \left(\frac{h}{2} - t_f - \frac{z_{pl,fi,t} - t_f}{2} \right) + (f_{ay,f,t} - f_{ay,w,t}) b t_f (h - t_f) \quad (2)$$

$$z_{pl,fi,t} = \frac{t_w f_{ay,w,t} h + (b - t_w) \cdot t_f \cdot f_{c,t}}{2 \cdot t_w f_{ay,w,t} + (b - t_w) \cdot f_{c,t}} \quad (3)$$

En caso de vigas formadas por perfiles de acero, la norma UNE-EN 1993-1-2:2011 [4] establece que el coeficiente $\chi_{LT,fi}$ es función de la esbeltez adimensional a PL para la temperatura correspondiente al ala comprimida de la sección, $\lambda_{LT,0,com}$, y del coeficiente de imperfección α , según se muestra en las expresiones (4), (5) y (6). En caso de VPE se propone emplear la expresión (7) para determinar $\lambda_{LT,0,com}$, donde $M_{fi,t,Rk}$ es el momento resistente de la sección compuesta y $M_{cr,fi,t}$ es el momento crítico elástico en el instante t . Este último se determina a partir de la sección homogeneizada, empleando el módulo de elasticidad longitudinal y transversal del acero del alma del perfil, considerando la sección completa de hormigón en el cálculo del momento de inercia de la sección homogénea respecto al eje de

menor inercia, despreciando la colaboración del hormigón en la inercia de alabeo de la sección homogénea, y considerando que la contribución del hormigón a la inercia homogénea a torsión es un 10% de la inercia de torsión de la sección completa del hormigón, de acuerdo con la norma UNE-EN 1994-1-1:2013 [5].

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} \quad (4)$$

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right] \quad (5)$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (6)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \sqrt{\frac{M_{fi,t,Rk}}{M_{cr,fi,t}}} \quad (7)$$

Finalmente, en base al estudio de Vila Real et al. [8], se considera modificar el coeficiente de reducción a PL para tener en cuenta la variación del diagrama de momentos flectores de las vigas de estudio en según las expresiones (8) y (9), adoptando los valores de k_c recogidos en la norma UNE-EN 1993-1-1:2008 [6].

$$\chi_{LT,fi,mod} = \frac{\chi_{LT,fi}}{f} \leq 1 \quad (8)$$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \quad (9)$$

2.2 Calentamiento de VPE en situación de incendio

La evolución de la temperatura en VPE expuestas a fuego normalizado [2] se determina en base a la norma UNE-EN 1994-1-2:2011 [7]. Para ello se proponen dos esquemas de calentamiento: en el primero se considera una separación por componentes, figura 3a, y por lo tanto distinta evolución de temperaturas en ala y alma, suponiendo que no existe transferencia térmica entre ellas; en el segundo la temperatura de la sección se considera constante, de modo que el calentamiento del alma del perfil sucede por conducción de calor desde las alas, que son las que están expuestas al fuego, según se representa en la figura 3b. En ambos casos se aplica la formulación del calentamiento del acero sin protección, expresión (10), excepto en el caso del alma en el supuesto de separación por componentes, cuyo calentamiento se determina a través de la expresión correspondiente al acero protegido, ecuaciones (11) y (12) considerando constantes las propiedades térmicas del hormigón. En la tabla 1 se muestran los factores de sección empleados en ambos supuestos de cálculo.

$$\Delta\theta_{unif,t} / \Delta\theta_{f,t} = k_{sombra} \left(\frac{1}{c_a \cdot \rho_a} \right) \cdot \left(\frac{A_i}{V_i} \right) \cdot \dot{h}_{net} \cdot \Delta t \quad (10)$$

$$\Delta\theta_{w,t} = \left[\left(\frac{\lambda_p / d_p}{c_a \rho_a} \right) \cdot \left(\frac{A_{p,i}}{V_i} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + w/3} \right) \cdot (\theta_t - \theta_{w,t}) \cdot \Delta t \right] - \left[(e^{w/10} - 1) \cdot \Delta\theta_t \right] \quad (11)$$

$$w = \left(\frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \right) \cdot d_p \cdot \left(\frac{A_{p,i}}{V_i} \right) \quad (12)$$

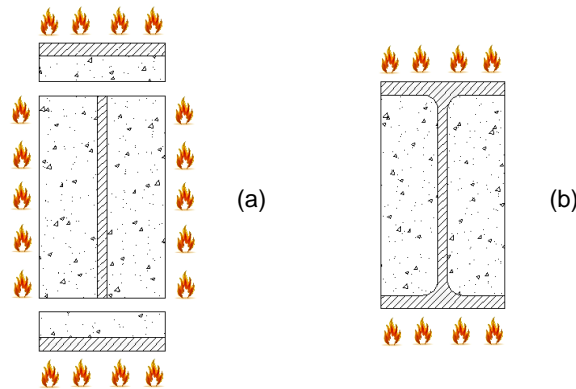


Figura 3: Esquema de calentamiento de la sección parcialmente embebida expuesta a fuego en todo el contorno, (a) con separación de componentes, (b) considerando temperatura uniforme

Tabla 1: Factor de sección de los constituyentes de acero de la viga parcialmente embebida

Factor de sección	Ala perfil (a)	Alma perfil (a)	Perfil (b)
$\frac{A_i}{V_i} / \frac{A_{p,i}}{V_i}$	$\frac{2 \cdot t_f + b}{t_f \cdot b}$	$\frac{2}{t_w}$	$\frac{2 \cdot (b + 2 \cdot t_f)}{A_{perfil}}$

El análisis del calentamiento de la sección de estudio, representada en la figura 1, considera que la temperatura de la sección es uniforme debido a las reducidas dimensiones de la misma, con canto inferior a 500mm.

El flujo neto de calor sobre las superficies expuestas considera la transferencia de calor por convección y radiación, y se determina en base al coeficiente de transmisión por convección, α_c , a la temperatura del gas en la proximidad del elemento expuesto al fuego, θ_g , a la temperatura de la superficie del elemento, θ_m , al factor de forma, Φ , a la emisividad de la superficie del elemento, ε_m , a la emisividad del fuego, ε_f y a la temperatura efectiva de la radiación, θ_r , mediante las expresiones (13) (14) y (15). En el análisis expuesto se emplean los valores de emisividad y de coeficiente de convección propuestos en la normativa [4][7], que corresponden con $\varepsilon_m=0.7$, $\varepsilon_f=1$ y $\alpha_c=25W/m^2K$.

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (13)$$

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad \text{W/m}^2 \quad (14)$$

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] \quad \text{W/m}^2 \quad (15)$$

3. ANÁLISIS NUMÉRICO

3.1 Modelo térmico

El modelo de EF simula el calentamiento por radiación y convección a través del contorno del tramo situado en el interior del horno, ver figura 1, y permite obtener el campo de temperaturas en la viga a lo largo del tiempo de exposición a fuego estándar ISO834 [2]. El comportamiento térmico del perfil y del hormigón se simula empleando el elemento tridimensional SOLID70 de ANSYS [9], el del contacto perfil-hormigón con el elemento tipo muelle COMBIN39 [9], que conecta nodo a nodo la malla del perfil a la del hormigón, y el de la armadura longitudinal mediante el elemento tipo barra LINK33 [9], según se muestra en al figura 4a.

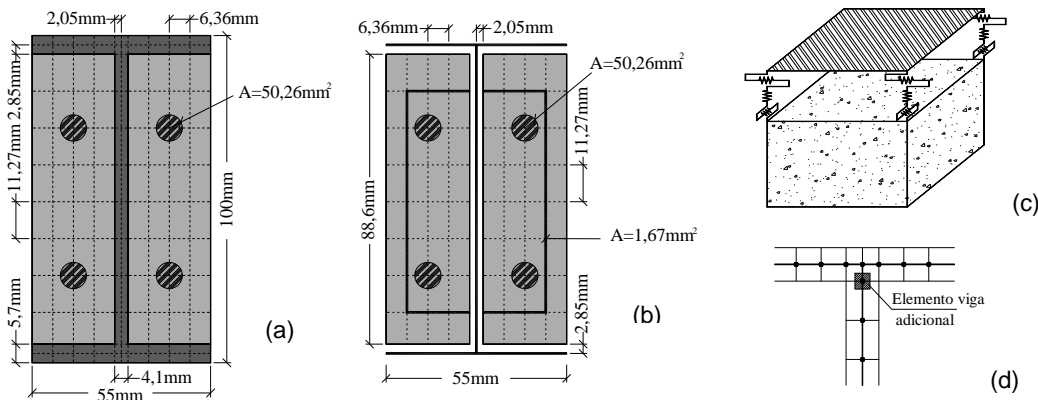


Figura 4: Modelo numérico para el análisis de VPE: (a) Térmico, (b) mecánico; (c) modelo conexión mecánica perfil-hormigón; (d) modelización curvatura ala-ala en modelo mecánico

Las propiedades térmicas del acero, del hormigón y del refuerzo corresponden con las indicadas en las normas UNE-EN 1993-1-2:2011 [4] y UNE-EN 1992-1-2:2011 [10], mientras que el comportamiento térmico del contacto perfil-hormigón se define mediante una curva flujo de calor vs temperatura, adoptando una conductancia de $67\text{W/m}^2\text{K}$, obtenida mediante optimización del modelo [11]. En las superficies expuestas a calentamiento se considera una emisividad de 0.7 y un coeficiente de convección de $25\text{W/m}^2\text{K}$ [4][7].

3.2 Modelo mecánico

El comportamiento mecánico del perfil se simula a través de elementos tipo cáscara SHELL181 de ANSYS [9], situados en el plano medio del perfil, cuyo espesor coincide con el nominal de

las alas y alma de los perfiles IPE100, según se muestra en la figura 4b. El modelo del hormigón armado es discreto, empleando el elemento sólido SOLID65 de ANSYS [9] para el hormigón, y el elemento tipo barra LINK8 [9] para el refuerzo, considerando el contacto perfecto entre ambos. El área de las barras que simulan la armadura longitudinal corresponde con su área nominal, mientras que la de la armadura transversal corresponde con la cuantía de armadura que existe cada 10mm, de modo que en el modelo aparece un cerco en cada sección. El contacto mecánico perfil-hormigón se resuelve nodo a nodo mediante tres elementos tipo muelle, COMBIN39 ANSYS [7], previamente validados [12]: dos simulan el contacto tangencial y el tercero el comportamiento normal, según se muestra en la figura 4c. Finalmente, para compensar la curvatura y el solape ala-alma del perfil se introducen elementos tipo viga, BEAM 188 de ANSYS [9], en el nudo indicado en la figura 4d.

La curva tensión-deformación del acero a temperatura ambiente corresponde con la obtenida en los ensayos de caracterización [1], que a altas temperaturas se transforma según la norma UNE-EN 1993-1-2:2011 [4], según se representada en la figura 5(a). La curva tensión-deformación del hormigón a temperatura ambiente corresponde con la del hormigón C20/25, con un grado de confinamiento igual a 2, transformando la curva propuesta en la norma UNE-EN 1992-1-1:2010 [13] con el modelo de Mander [14]. Para distintos niveles de temperatura las curvas se modifican a través de los correspondientes factores $f_{c,\theta}$, f_{ck} , $\epsilon_{c1,\theta}$ y $\epsilon_{cu1,\theta}$ de la norma UNE-EN 1992-1-2:2011 [10], según se muestran en la figura 5(b).

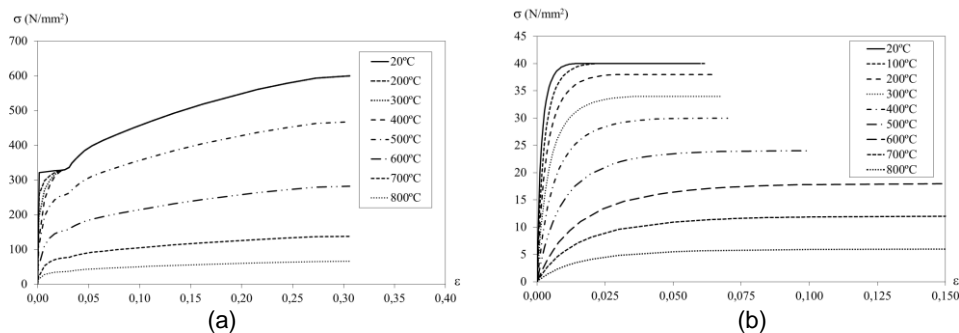


Figura 5: Curvas tensión deformación empleadas en el modelo numérico para (a) el acero del perfil y (b) el hormigón, para distintos niveles de temperatura.

El apoyo doble articulado inferior se simula anulando los movimientos de los nodos que ocupan la posición del bulón, y el apoyo horquilla superior anulando los movimientos normales al contorno en los nodos que definen el apoyo horquilla. La carga mecánica, de valor constante, se aplica en los nodos de encuentro ala-alma en las dos secciones centro de luz a lo largo del proceso de carga térmica, que se simula a través de la aplicación del resultado numérico del campo de temperaturas para cada instante de exposición a fuego.

2.3 Resultado del análisis numérico

En la tabla 2 se muestra, para distintos valores de fuerza aplicada, el resultado numérico de los instantes de exposición a fuego final y de fallo según la norma UNE-EN 1363-1:2015 [3].

El desplazamiento lateral obtenido numéricamente en los modelos más solicitados, con cargas de 40 y 50kN, no logra la asíntota. Este comportamiento puede ser provocado por el fallo por formación de rótula plástica o por problema de resolución numérica, que no permite evaluar correctamente el fallo por PL.

Tabla 2: Resultado del estudio numérico de la RF de VPE de 1.21m sometidas a flexión en tres puntos con distintos valores carga aplicada, expuestas a fuego normalizado [29]

Fuerza aplicada (N)	Nivel de carga (%Mpl)	t_{ult} (s)	$t_{EN 1363-1}$ (s)
10000	20%	1799	1419
18252	37%	1240	988
20000	41%	1203	950
27379,3	56%	990	841
30000	61%	945	809
36505,9	74%	810	638
40000	82%	721,9(*)	588
50000	102%	503(*)	266

4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS Y ANALÍTICOS

En la figura 6 se muestra el resultado analítico de la evolución de la temperatura del perfil, considerando ésta uniforme en la sección. Esta curva se ajusta correctamente a los resultados numéricos de la evolución de la temperatura del ala del perfil, clave para determinar la resistencia a flexión de la sección en situación de incendio.

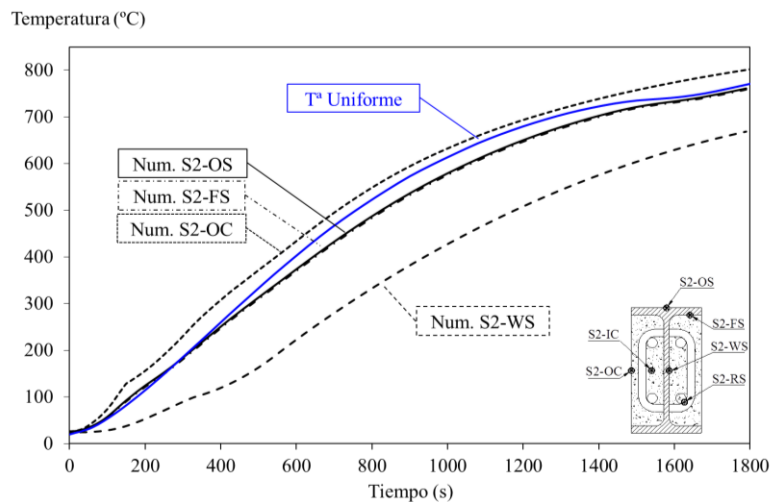


Figura 6: Comparación de los resultados térmicos numéricos y analíticos.

En base al resultado analítico de las temperaturas de la sección, en la figura 7 se muestra el resultado analítico del momento resistente, $M_{fi,\theta,Rd}$, representado en trazo negro discontinuo, y del momento resistente a PL de las VPE de estudio, $M_{b,fi,\theta,Rd}$, representado en trazo negro continuo. Estas curvas se comparan con el resultado numérico del instante de inestabilidad por PL y de fallo según la norma la norma UNE-EN 1363-1:2015 [3]. En la figura se modifica la representación de los valores de carga última de las vigas más solicitadas, ya que en éstas no se logra simular la inestabilidad por PL.

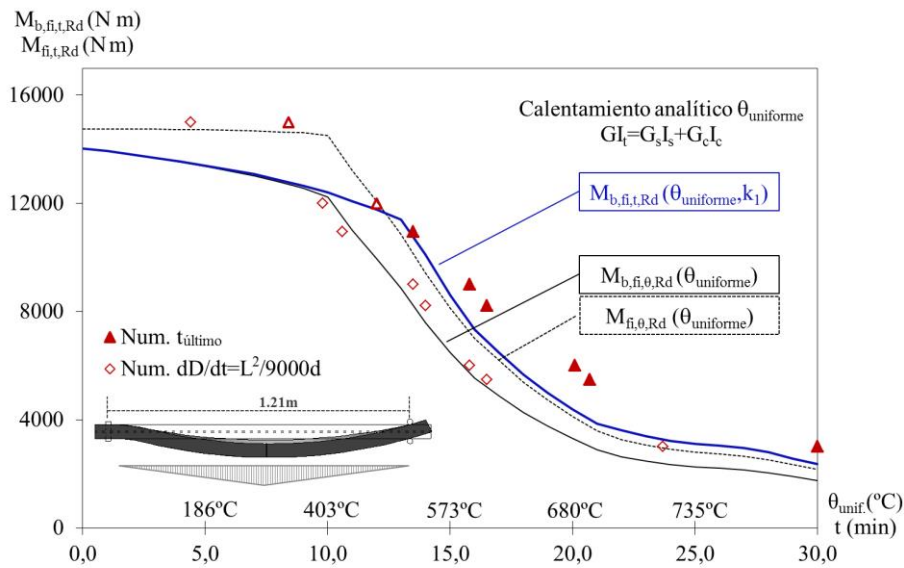


Figura 7: Comparación de los resultados numéricos que simulan la exposición a fuego normalizado con los analíticos obtenidos a partir de la temperatura uniforme analítica.

El resultado del momento resistente a PL se ajusta correctamente al resultado numérico del instante en que se supera el criterio de velocidad de deformación, representado con rombos, pero infravalora la RF de las vigas sometidas, representados como triángulos rojos, sobre todo en los casos sometidos a menores niveles de carga.

La temperatura uniforme obtenida analíticamente se ajusta a la temperatura del contorno pero no al núcleo de la sección, favoreciendo un resultado de la resistencia conservador. Afectando el momento resistente de la sección transversal para una temperatura uniforme, $M_{fi,\theta,Rd}$, por el factor de adaptación por temperaturas no uniformes en la sección de la norma UNE-EN 1993-1-2:2011 [4], siguiendo la expresión (16), se obtiene el momento resistente a PL para el instante t , representada en trazo azul, que mejora el ajuste de las vigas que soportan exposiciones a fuego superiores a 15 minutos. Para ello se emplea un factor de adaptación por temperaturas no uniformes en la sección, k_1 , igual a 0.7, y un factor de adaptación por temperaturas no uniformes a lo largo de la viga, k_2 , igual a 1.

$$M_{fi,t,Rd} = M_{fi,\theta,Rd} / k_1 \cdot k_2 \quad (16)$$

4. CONCLUSIONES

Los resultados numéricos obtenidos con el modelo expuesto en este estudio permiten validar el procedimiento de cálculo propuesto para determinar el momento resistente a PL de VPE, considerando uniforme la temperatura de la sección, analíticamente en base a la norma UNE-EN 1994-1-2:2011 [7]. Para la geometría analizada, estos resultados analíticos se ajustan correctamente al instante en el que se alcanza el criterio de velocidad de deformación. Al afectar los resultados por el factor de adaptación por temperaturas no uniformes en la sección se mejora el ajuste al resultado numérico del momento resistente a PL de las vigas.

REFERENCIAS

- [1] P.A.G. Piloto, A.B.R. Gavilán, Marco Zipponi, A. Marini, L.M.R. Mesquita, G. Plizzari, *Experimental investigation of the fire resistance of partially encased beams*, Journal of Constructional Steel Research, Volume 80, January 2013, Pages 121-137.
- [2] ISO 834-1:1999. Fire resistance tests- Elements of building construction. Part 1: General requirements, 1999.
- [3] UNE-EN 1363-1:2015. Ensayos de resistencia al fuego Parte 1: Requisitos generales, 2015.
- [4] UNE-EN 1993-1-2:2011. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego, 2011.
- [5] UNE-EN 1994-1-1:2013. Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios, 2013.
- [6] UNE-EN 1993-1-1:2008. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios, 2008.
- [7] UNE-EN 1994-1-2:2011. Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego, 2011.
- [8] P.M.M. Vila Real, N. Lopes, L. Simões da Silva, J.-M. Franssen. (2004). *Lateral-torsional buckling of unrestrained steel beams under fire conditions: improvement of EC3 proposal*. Computers & Structures, 82(20-21), 1737-1744.
- [9] ANSYS® Academic Research, Release14.0, ANSYS Help System, Element Library, ANSYS, Inc.
- [10] UNE-EN 1992-1-2:2011. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego, 2011.
- [11] P.A.G. Piloto, A.B. Ramos Gavilán, L.M.R. Mesquita, *Determinação numérica da condutância térmica da interface aço-betão para estruturas mistas a temperaturas elevadas*, de II Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica, Aveiro (Portugal), 2008.
- [12] A.B. Ramos Gavilán, Estudio numérico y experimental del comportamiento a flexión de vigas parcialmente embebidas sometidas a altas temperaturas, Ph.D thesis, Universidad de Salamanca (Spain), 2015.
- [13] UNE-EN 1992-1-1:2010. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación, 2010.
- [14] J. Mander, M. Priestley y R. Park, *Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete*, Journal of Structural Engineering, vol. 114, nº 8, p. 1804–1826, 1988.