

## Thermal modelling of the steel-concrete connections test at elevated temperatures

Rafael Larrua Quevedo<sup>1</sup>, Valdir Pignatta Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Construcciones. Universidad de Camagüey. Carretera Circunvalación Norte km 5 1/2. CP 17300. Camagüey, Cuba. Tel: 53 32 262487 Fax: 53 32 262336. rafael.larrua@reduc.edu.cu. <sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica. Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo. Av. Prof. Almeida Prado – TRAV. 2, 83-05508-900. São Paulo – SP, Brasil. Tel.: +55 11 3091 5562; fax: +55 11 3091 5181. valpigss@usp.br

### Abstract

A bi-dimensional numerical model of the connections test at elevated temperatures was developed by means of the finite element computer program "SuperTempcalc". Essential references of the recommended criteria were taken from the eurocodes EN 1991-1-2 and EN 1994-1-2. Consequently, the thermal conductivity and the specific heat of the steel and the concrete are adopted as dependent values of the temperature. The density of each material is defined as a constant value. The exposed parts of the specimen cross-section are considered under the action of the standard fire ISO 834-1, while the non-exposed parts are considered at room temperature. The results of the push-out tests at elevated temperatures developed at CTICM, France, were used to calibrate the models against the experimental data. In general, a relatively simple model was obtained. It also has the advantage of being very efficient and quick to use. In terms of obtaining reliable temperatures for a structural analysis the model is more than adequate. The sensitivity of the calibrated model to variation in connector diameter and height is assessed, taking into account the defined scope of the formulations of EN 1991-1-2 and EN 1994-1-2. Also, different alternatives on the level at which should be considered the concrete temperatures are analyzed in order to evaluate the simplified method of EN 1994 1-2.

**Keywords:** composite structures, fire, push-out test, thermal analysis, numerical modeling.

## Modelación térmica del ensayo de conexiones acero-hormigón a elevadas temperaturas

### Resumen

Se desarrolla un modelo numérico bidimensional del ensayo de conexiones acero – hormigón a elevadas temperaturas, mediante el programa de computación SuperTempcalc, basado en el método de los elementos finitos. Se toman como referencias esenciales los criterios recomendados en los eurocódigos EN 1991-1-2 y EN 1994-1-2. Consecuentemente, la conductividad térmica y el calor específico del acero y el hormigón adoptan valores dependientes de la temperatura, en tanto la densidad de cada material se considera constante. Las partes expuestas de la sección transversal de los especímenes se consideran bajo la acción del fuego estándar ISO 834-1, en tanto las partes no expuestas se consideran a temperatura ambiente. Los resultados de los ensayos *push-out* en situación de incendio desarrollados en el CTICM, Francia, fueron utilizados para calibrar los modelos respecto a datos experimentales. En general, se obtiene un modelo relativamente simple, eficiente y fácil de usar, que ofrece temperaturas fiables para el análisis estructural. Finalmente, se exponen los resultados de la evaluación de la sensibilidad del modelo calibrado a la variación del diámetro y la altura del conector, dentro de los alcances definidos en EN 1991-1 y EN 1994-1-2, y son analizadas diferentes alternativas acerca del nivel donde debe ser considerada la temperatura en el hormigón, de cara a la evaluación del método simplificado de EN 1994-1-2.

**Palabras clave:** estructuras compuestas, fuego, ensayo de conectores, análisis térmico, modelación numérica.

## Introducción

Un componente esencial de una viga compuesta es la conexión entre la sección de acero y la losa de hormigón, que cumple la función de transmitir las fuerzas de cortante longitudinal a través de la superficie de contacto acero-hormigón. Hasta la fecha, el conector tipo perno es el más utilizado en la práctica internacional.

Internacionalmente, han sido desarrollados un gran número de ensayos de conectores, denominados usualmente como ensayos *push-out*, para evaluar la resistencia y el comportamiento carga-deslizamiento de las conexiones a temperatura ambiente, principalmente relacionados con las conexiones tipo perno con cabeza (*stud*). Un espécimen *push-out* está formado por un perfil corto que se conecta a dos losas de hormigón por medio de los conectores que se pretenden estudiar [1].

La exposición de los materiales estructurales, tales como el acero y el hormigón, a altas temperaturas hace degenerar sus características físicas y químicas, causando reducción de la resistencia y la rigidez, lo que debe ser tomado en cuenta en el diseño de las estructuras en situación de incendio.

Contrastando con la gran cantidad de ensayos *push-out* llevados a cabo a temperatura ambiente, ha sido realizado un número reducido del propio tipo de ensayo a elevadas temperaturas. En 1992, fueron realizados los primeros ensayos de conexiones a elevadas temperaturas en el *Centre Technique Industriel de la Construction Métallique* (CTICM), Francia. Para tales propósitos, los investigadores Kruppa y Zhao [2-4] diseñaron un dispositivo especial y original. Los especímenes, que guardan correspondencia con la probeta estándar para temperatura ambiente de EN 1994 1-1 [1], fueron sometidos a la acción del fuego estándar ISO 834-1 [5], manteniendo la carga constante para diferentes niveles de la misma. Los resultados de esta relevante investigación sirvieron de base para el establecimiento de los criterios para el diseño de las conexiones tipo perno en situación de incendio, vigentes en el eurocódigo EN 1994-1-2 [6].

Recientemente han sido realizados nuevos ensayos de conexiones tipo perno a elevadas temperaturas, entre los que sobresalen tres programas experimentales desarrollados en la región

asiática. Satoshi *et al.* [7] consideraron especímenes *push-out* modificados, con conectores tipo perno de 19 mm de diámetro y 110 mm de altura, manteniendo, como Kruppa y Zhao [2-4], la carga constante para diferentes niveles de carga. A diferencia de la investigación en el CTICM [2-4] los especímenes cuentan con una sola losa de hormigón y se someten a una curva de fuego estándar modificada, con una rama paralela al eje de las abscisas igual a 700°C a partir de los 11,60 minutos de exposición al fuego. Los autores del presente artículo comprobaron que en los modelos numéricos realizados para este caso, tomando en cuenta criterios similares a los que se exponen posteriormente en el trabajo, no se logra una efectiva correspondencia entre los resultados numéricos y los experimentales, debido principalmente, a que las propiedades térmicas consideradas para el hormigón en EN 1994-1-2 [6] se basan en ensayos con aplicación de la curva de fuego estándar ISO 834-1 [5]. Por su parte, los programas experimentales desarrollados por Choi *et al.* [8] y Chen *et al.* [9,10], introducen la variante de aplicar carga hasta la rotura de los especímenes para temperaturas constantes seleccionadas, con secciones transversales que cuentan con una losa de hormigón (en el primer caso) o con dos losas de hormigón (en el segundo caso). En general, puede afirmarse que los programas experimentales desarrollados hasta el presente cuentan con la limitación de no abarcar todas las situaciones de diseño declaradas en los alcances de EN 1994-1-1 [1] y EN 1994-1-2 [6], especialmente en lo relacionado con la relación entre la altura ( $h_{sc}$ ) y el diámetro del conector ( $d$ ), que varía entre 4,55 y 6,25, en tanto las citadas normas admiten relaciones mayores o iguales a 3, por lo que resulta obvia la ausencia de estudios experimentales donde se consideren valores bajos de esta relación.

Dado que los ensayos *push-out* en situación de incendio constituyen una opción costosa, se hace necesario desarrollar procedimientos de modelación que permitan predecir el comportamiento térmico y estructural de las conexiones y complementar la escasa información experimental disponible, así como visualizar la necesidad y orientación de nuevos programas experimentales.

El presente artículo trata acerca del comportamiento de las conexiones en estructuras compuestas de acero y hormigón en situación de

incendio y en particular se examina el análisis térmico del ensayo *push-out* a elevadas temperaturas de las conexiones tipo perno, teniendo como referencia el relevante programa experimental desarrollado en el CTICM, que continúa siendo la base experimental de los criterios actuales del EN 1994-1-2 [6], en tanto los programas experimentales más recientes no aportan significativamente a la variedad de situaciones de diseño representadas. A lo anterior se añade la información detallada que estuvo al alcance de los autores, facilitada gentilmente por los investigadores Kruppa y Zhao [2-4].

### Programa experimental del CTICM

En el programa experimental desarrollado en el CTICM fueron realizados un total de 31 ensayos *push-out* en situación de incendio bajo carga constante, de los cuales 20 contaron con conectores tipo perno en presencia de losa maciza, los que constituyen la fuente de información experimental de la presente investigación. Todos los especímenes contaron con pernos de 100 mm de altura total ( $h_{sc}$ ), en tanto fueron considerados diámetros ( $d$ ) de 19 mm (17 especímenes), 16 mm (2 especímenes) y 22 mm (1 espécimen). La resistencia a la compresión del hormigón de las losas estuvo en el rango de 34,5 MPa a 43,5 MPa, en tanto las cargas constantes por conector aplicadas fueron de 17,5; 25,0; 50,0; 75,0 y 109,25 kN [2].

Una de las características más sobresaliente en la concepción del programa experimental es que los dos espacios formados entre el alma del

perfil metálico y las losas de hormigón forman parte del horno, logrando así que el perfil metálico y las caras interiores de las losas se expongan directamente a los gases calientes (Figura 1). La sección transversal del espécimen, al nivel de los conectores, constituye el dominio de la modelación geométrica bidimensional realizada por medio del software SuperTempcalc, tal como se detalla en la Figura 2.

En todos los ensayos, la temperatura del gas en el horno fue controlada para alcanzar la relación estándar temperatura-tiempo especificada en EN 1991-1-2 [6] e ISO 834-1 [5], dada por la ecuación 1.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

donde  $\theta_g$  es la temperatura del gas en el horno (°C) y  $t$  es el tiempo (minutos).

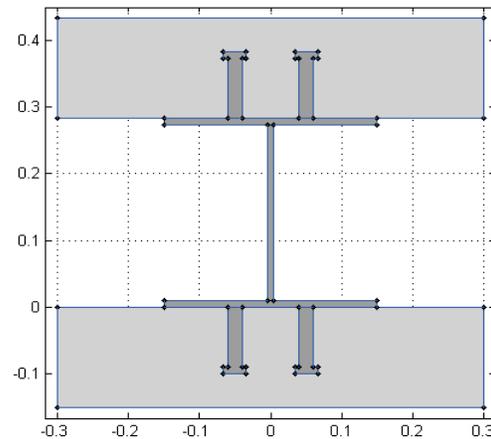


Figura 2. Modelación de la geometría.

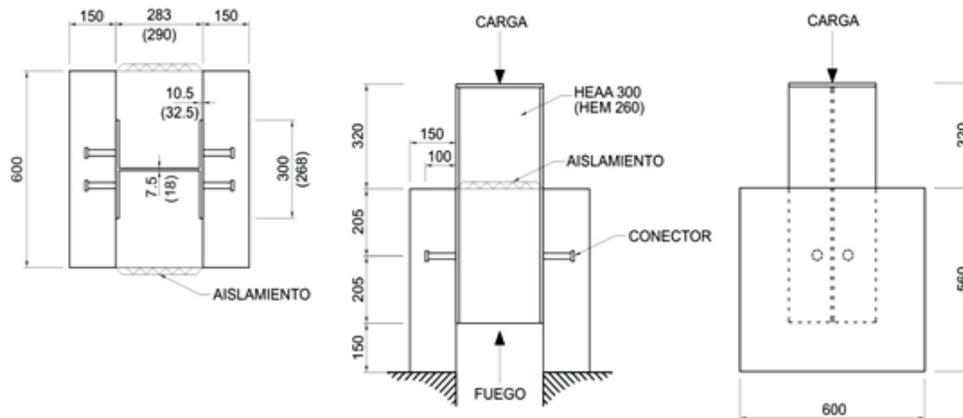


Figura 1. Detalles del dispositivo de ensayo (CTICM).

## Modelación numérica

### Generalidades

La modelación numérica es una herramienta ampliamente utilizada hasta la fecha en la solución de problemas de ingeniería estructural en situación de incendio [11-13]. A su vez, numerosos estudios previos demuestran la eficacia del software SuperTempcalc (Temperature Calculation and Design v.5) desarrollado por FSD (Fire Safety Design, Suecia) en la modelación de problemas de transferencia de calor en ingeniería estructural [14, 15, 16]. Este programa pertenece a la familia de las aplicaciones de modelación bidimensional basadas en el método de los elementos finitos (MEF). La presente sección se dedica a exponer los criterios seguidos en la modelación térmica del ensayo *push-out* de las conexiones tipo perno en losas macizas, utilizando el citado software.

### Acciones térmicas

El desarrollo de las temperaturas es controlado por la combinación de la transferencia de calor por convección y por radiación. Consecuentemente, el flujo neto de calor está dado por la suma del flujo neto por convección, controlado por el coeficiente de convección ( $\alpha_c$ ), y el flujo neto por radiación, controlado por la emisividad resultante ( $\epsilon_r$ ). El desarrollo de las temperaturas del espécimen en el horno depende de la emisividad del material ( $\epsilon_m$ ) y la emisividad del fuego ( $\epsilon_f$ ). La emisividad resultante ( $\epsilon_r$ ) es generalmente aproximada al producto de  $\epsilon_m$  y  $\epsilon_f$ . En EN 1994-1-2 [6] y EN 1991-1-2 [17] la emisividad del fuego ( $\epsilon_f$ ) es tomada usualmente como 1,0. EN 1994-1-2 [6] considera la emisividad del acero y el hormigón relacionada con las superficies de los miembros igual a 0,7.

En la concepción de la modelación desarrollada, las partes expuestas de la sección se consideran sometidas al fuego estándar ISO 834-1 [5], con el coeficiente de convección ( $\alpha_c$ ) y emisividad resultante ( $\epsilon_r$ ) de 25 W/m<sup>2</sup>K, tomando en cuenta lo definido en EN 1991-1-2 [17] para la curva de fuego estándar ISO 834-1 [5], y 0,7 respectivamente. En las partes no expuestas se considera la acción de la temperatura ambiente de 20°C con un coeficiente de convección de 9 W/m<sup>2</sup>K.

## Propiedades térmicas de los materiales

Los autores del presente artículo siguen el enfoque de considerar las propiedades térmicas de los materiales recomendadas en EN 1994-1-2 [6], no sólo porque no está disponible la información experimental detallada sobre las mismas que se requiere, sino también con la intención de desarrollar modelos más universales basados en propiedades normativas, factibles de ser utilizados creativamente en el estudio de diversas situaciones de diseño afines.

En cuanto al acero, la conductividad térmica y el calor específico han sido incluidos como propiedades dependientes de la temperatura, de acuerdo con EN 1994-1-2 [6]. En el propio código también se establece un valor de densidad independiente de la temperatura igual a 7850 kg/m<sup>3</sup>.

La conductividad térmica del hormigón de peso normal, de acuerdo con EN 1994-1-2 [6], es también una propiedad dependiente de la temperatura y debe determinarse entre el límite superior y el límite inferior definidos en ese código [6, 18, 19]. Para estructuras compuestas se recomienda el uso del límite superior, tomando en cuenta que el mismo fue definido a partir de resultados experimentales en secciones compuestas acero-hormigón [18]. Sin embargo, los autores del presente artículo han considerado apropiado evaluar la sensibilidad de las temperaturas que se predicen al uso de uno u otro límite, dado que la sección transversal de los especímenes *push-out* no coincide exactamente con las utilizadas en la definición del límite superior [18]. Por otra parte, el calor específico del hormigón de peso normal fue incluido como una propiedad dependiente de la temperatura, en tanto la densidad de este material se toma como un valor independiente de la temperatura en el intervalo entre 2300-2400 kg/m<sup>3</sup>.

## Modelación de la geometría y las condiciones de frontera

El dominio es coincidente con la sección transversal del espécimen *push-out* implementado por Kruppa y Zhao [2-4], lo que incluye los conectores tipo perno (Figura 2).

La definición de las condiciones de frontera, tal como indica la Figura 3, incluye el contorno 1 sobre el que se considera actuando el fuego es-

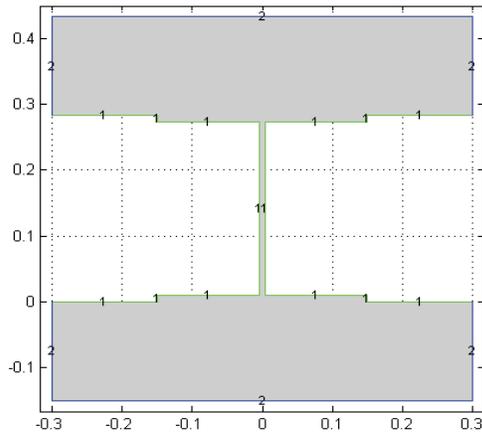


Figura 3. Modelación de las condiciones de frontera.

tándar ISO 834-1 [5], mientras que el contorno 2 representa la región no expuesta, en la que actúa la temperatura ambiente (20°C).

### Selección del tipo de elemento finito y la densidad de malla

Debido a que la sección transversal de los especímenes está compuesta por geometrías rectangulares en todos los casos, la malla se generó con elementos rectangulares de cuatro nodos. Primeramente, la malla se definió por elementos rectangulares con el lado mayor  $L \leq 0,01$  m. Entonces, se procedió a realizar un refinamiento local en la región demarcada por el ala del perfil y la altura de los conectores. El lado mayor de cada rectángulo se redujo a  $L \leq 0,005$  m (ver Figura 4).

### Resultados y discusión

Con el propósito de definir la solución que conduce a una mejor correspondencia entre los resultados experimentales y numéricos, inicialmente se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros más influyentes en las temperaturas

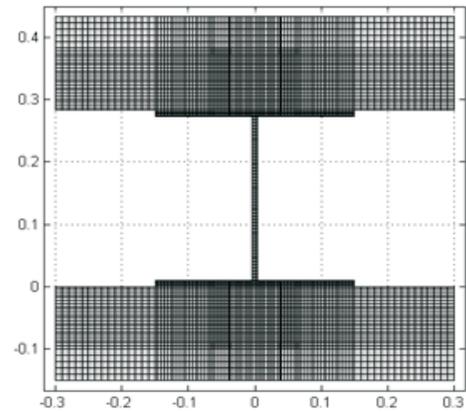


Figura 4. Discretización del dominio.

en el ala del perfil de acero ( $\theta_p$ ), en la base del conector ( $\theta_{sc}$ ) y en el hormigón ( $\theta_c$ ), estas últimas determinadas al nivel de la mitad de la altura del conector (tal como fueron medidas experimentalmente) [2-4]. En la Tabla 1 se muestran las variables seleccionadas y sus niveles, lo que conduce a la evaluación de los resultados que ofrecen 18 modelos diferentes.

La Figura 5 a) ilustra la baja dependencia de los valores de la temperatura del hormigón, según las predicciones de los modelos, respecto a los cambios en la densidad del hormigón. Por otra parte, en las Figuras 5 b) y 5 c) puede apreciarse la poca influencia del contenido de humedad y la conductividad térmica del hormigón en las temperaturas al nivel del ala y en la base del conector, respectivamente. En la medida que el contenido de humedad se incrementa las temperaturas en el hormigón decrecen (Figura 5 b), en tanto el uso del límite superior conduce al incremento de las temperaturas en el hormigón (Figura 5 c).

Para la calibración del modelo se tomaron como referencia inicial los valores medios expe-

Tabla 1  
Diseño del experimento numérico

Variables	Niveles		
Densidad del hormigón (kg / m <sup>3</sup> )	2300	2350	2400
Contenido de humedad (%)	1,50	4,25	7,00
Conductividad del hormigón (W/m K)	Límite superior	Límite inferior	

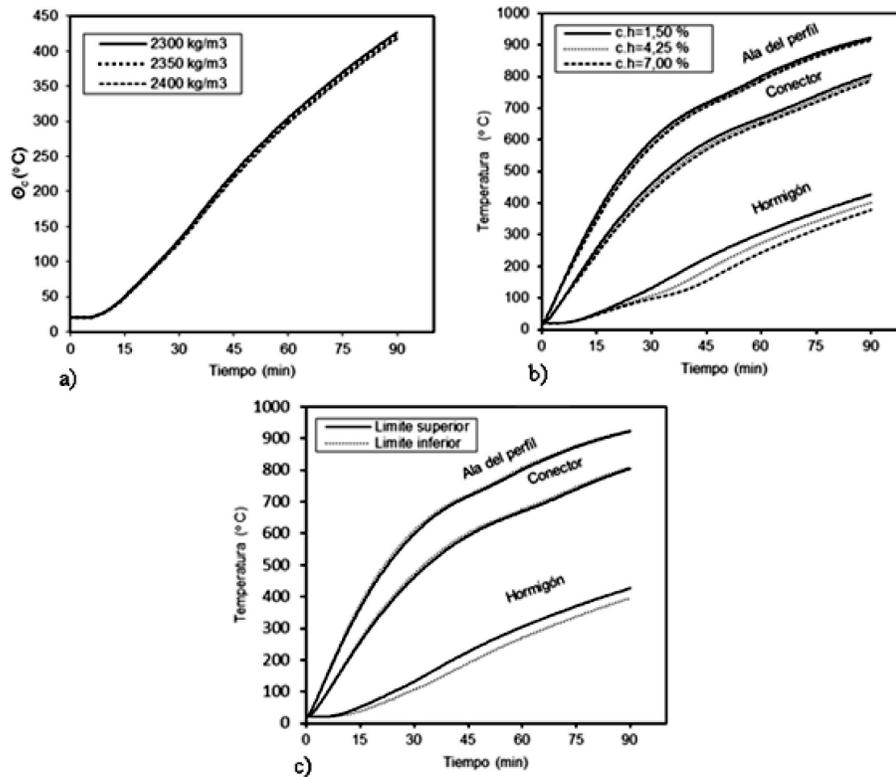


Figura 5. Sensibilidad de las temperaturas. a) A la variación de la densidad del hormigón. b) A la variación del contenido de humedad en el hormigón. c) A la variación de la conductividad térmica del hormigón.

rimentales de la temperatura del ala ( $\theta_f$ ), la temperatura en la base del conector ( $\theta_{sc}$ ) y la relación entre las mismas ( $\theta_{sc}/\theta_f$ ) correspondientes a tres especímenes con características similares (resistencia a la compresión del hormigón de 34,5 MPa y carga constante por conector de 50 kN). La Tabla 2 muestra los valores experimentales de  $\theta_f$ ,  $\theta_{sc}$  y  $\theta_{sc}/\theta_f$  para cada espécimen y sus valores medios.

Tabla 2  
Valores experimentales en los especímenes seleccionados para la calibración

Especímen	$\theta_f$ (oC)	$\theta_{sc}$ (oC)	$\theta_{sc} / \theta_f$
1	709	615	0,867
2	745	588	0,789
3	705	577	0,818
Valor medio	719.7	593.3	0,825

Se logra la mejor correspondencia entre los resultados numéricos y experimentales con la densidad del hormigón  $\rho_c = 2300 \text{ kg/m}^3$  y el contenido de humedad  $c.h = 1,5 \%$ , cuando se adopta el límite superior para la conductividad térmica del hormigón. Lo último guarda correspondencia con la recomendación, antes mencionada, del EN 1994-1-2 [6] sobre el tópico. La Figura 6 muestra la buena correspondencia entre los resultados experimentales y numéricos.

Por su parte, se alcanza una adecuada correspondencia de las relaciones experimentales y numéricas  $\theta_{sc}/\theta_f$  en el instante del fallo para cada uno de los 20 especímenes, cuando se determinan estas últimas a partir de los resultados del modelo calibrado, con valores medios de 0,836 (para las relaciones experimentales) y 0,804 (para las relaciones derivadas de resultados numéricos).

Tanto los resultados gráficos expuestos en la Figura 6 y lo comentado en el párrafo prece-

dente, resultan coherentes con los criterios actuales del método simplificado para la determinación de la resistencia de las conexiones tipo perno en situación de incendio de EN 1994 -1-2 [6], que recomienda que las temperaturas del conector y de la losa se consideren como el 80% y el 40% de la temperatura del ala superior del perfil de acero, respectivamente. Tómese en cuenta, que estos porcentajes fueron definidos a partir de las relaciones  $\theta_{sc}/\theta_f$  y  $\theta_c/\theta_f$  medidas experimentalmente en los ensayos del CTICM [2-4], lo que el modelo reproduce con efectividad.

Finalmente, se evalúa la sensibilidad del modelo calibrado a la variación del diámetro y la altura del conector, dentro de los alcances definidos en los eurocódigos estructurales, y se analizan diferentes alternativas acerca del nivel donde debe ser consi-

derada la temperatura en el hormigón. En tal sentido, los autores del presente artículo consideraron razonable valorar el comportamiento de la relación  $\theta_c/\theta_f$  cuando la temperatura promedio del hormigón se determina a un cuarto de la altura del conector, tomando en cuenta que los mecanismos de fallo de la conexión se concentran en la región cercana al ala del perfil de acero, la que a su vez queda sometida a las mayores temperaturas. Obviamente, mientras más baja sea la altura del conector, este nivel estará más próximo a la región de temperaturas más elevadas.

Se demuestra que el diámetro del conector tiene muy poca influencia en las relaciones  $\theta_{sc}/\theta_f$  y  $\theta_c/\theta_f$ , así como que la altura del conector no repercute significativamente en la relación  $\theta_{sc}/\theta_f$  en tanto la Figura 7 muestra claramente la in-

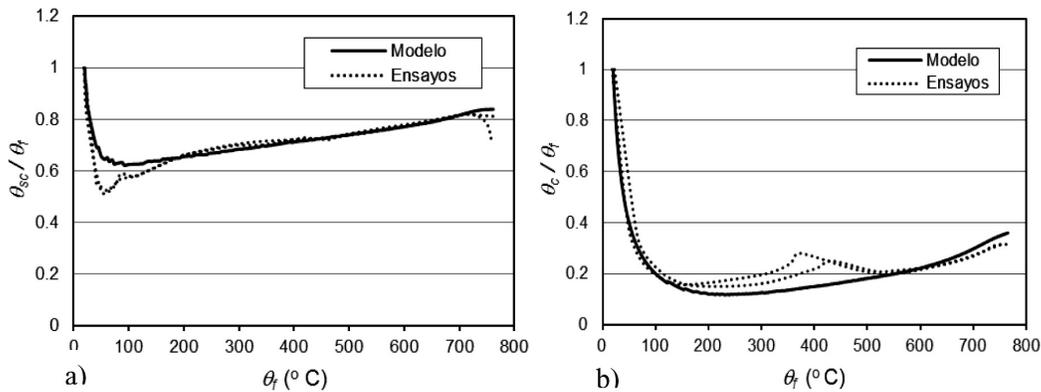


Figura 6. Modelo final. Relaciones experimentales y pronosticadas. a)  $\theta_{sc} / \theta_f$ , b)  $\theta_c / \theta_f$ .

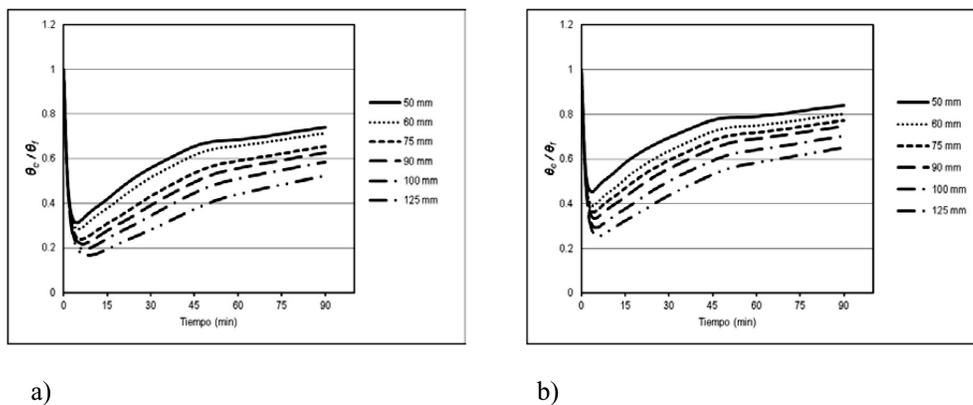


Figura 7. Comparación entre las relaciones numéricas  $\theta_c / \theta_f$  cuando se varia la altura del conector. a) la temperatura promedio del hormigón se determina en  $h_{sc}/2$ . b) la temperatura promedio del hormigón se determina en  $h_{sc}/4$ .

fluencia de la altura del conector y del nivel en que se considera la temperatura del hormigón en la relación  $\theta_c/\theta_f$ , al tiempo que muestra una gama de situaciones de diseño que incluyen el caso particular estudiado experimentalmente en CTICM ( $h_{sc} = 100$  mm y temperaturas en el hormigón consideradas en la mitad de la altura del conector) que condujo a la recomendación de considerar el 40% de la temperatura del ala del perfil de acero en la definición de la temperatura del hormigón, según el método simplificado de EN 1994-1-2 [6]. Igualmente se aprecia que es posible la existencia de situaciones de diseño conducentes a valores de la relación  $\theta_c/\theta_f$  superiores al considerado por el citado eurocódigo.

### Conclusiones

En el trabajo ha sido examinado el análisis térmico del ensayo *push - out* de conexiones tipo perno a elevadas temperaturas considerando la información experimental disponible y resultados numéricos generados por medio del software SuperTempcalc, debidamente calibrados con los resultados experimentales del programa experimental llevado a cabo en el CTICM, los que constituyen el fundamento de las formulaciones vigentes en el EN 1994-1-2. Subsecuentemente, fueron realizados estudios paramétricos con el objetivo de establecer los parámetros más influyentes en el desarrollo de las temperaturas.

Es esencial enfatizar en la connotación de los resultados resumidos en la Figura 7, que muestran claramente que la relación entre la temperatura del hormigón y la temperatura del ala del perfil de acero son marcadamente superiores cuando se utilizan conectores con alturas menores a la considerada en los ensayos en CTICM (100 mm), todo dentro de los alcances de EN 1994-1-1 y EN 1994-1-2, lo que se acentúa si la temperatura del hormigón se determina a un cuarto de la altura del conector. De lo anterior se infiere que considerar el 40% de la temperatura del ala del perfil de acero en la definición de la temperatura promedio del hormigón a los efectos del cálculo simplificado puede conducir, para situaciones de diseño específicas, a la sobrestimación de la resistencia de la conexión en situación de incendio.

La evaluación detallada del impacto de los resultados aquí expuestos en la resistencia de las

conexiones, así como la aplicación de los criterios de modelación descritos a otras tipologías de conectores y al caso de vigas de acero protegidas, serán objeto de futuros reportes.

### Agradecimientos

Los autores desean agradecer a CAPES (Coordinación para el Perfeccionamiento del Personal de Nivel Superior, Brasil) por la beca de investigación concedida y a la Universidad de São Paulo por el soporte ofrecido para el desarrollo del estudio. También agradecen profundamente a los investigadores Joel Kruppa y Bin Zhao por suministrar generosamente acceso a información pertinente sobre el programa experimental en CTICM.

### Referencias bibliográficas

1. CEN. EN 1994-1-1:2004: "Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings". European Committee for Standardization (2004).
2. Kruppa J. and Zhao B.: "Fire resistance of composite slabs with profiled steel sheet and composite steel concrete beams. Part 2: Composite Beams". ECSC Agreement n° 7210 SA 509 (1995).
3. Kruppa J. and Zhao B.: "Fire Resistance of Composite Beams to Eurocode 4 Part 1.2". J. Construct. Steel Research, Vol. 33 (1995) 51-69.
4. Zhao B.: "Essais et caractérisation du comportement des goujons en cisaillement a des températures élevées". Chapitre 2. Tesis Doctoral (1993) 53-85.
5. ISO 834-1: "Fire resistance tests - elements of building construction - part 1: general requirements". International Organization for Standardization. Geneva (1999).
6. CEN. EN 1994-1-2: 2005: "Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-part 1.2: General rules-structural fire design". European Committee for Standardization (2005).
7. Satoshi S., Michikoshi S, Kobayashi Y., Narihara H. "Experimental study on shear strength of headed stud shear connectors at

- high temperature". *J. Struct. Constr. Eng. AIJ* 73 (630) (2008) 1417-1433.
8. Choi S.K, Han S.H, Kim S.B, Nadjai A., Faris A., Choi J.Y.: "Performance of shear studs in fire". *Application of structural fire engineering-Proceedings of International Conference, Prague* (2009), 490-495.
  9. Chen L., Li G., Jiang S.: "Experimental studies on the behaviour of headed studs shear connectors at elevated temperatures". *Proceedings of the Seventh International Conference of Structures in Fire. M.Fontana, A. Frangi, M. Knobloch (Eds.). Zurich, Switzerland* (2012) 257-266.
  10. Larrua R. "Comportamento de estruturas mistas de concreto e aço em situação de incêndio". *Relatório final. Estágio de pesquisa em nível de pós-doutorado. Universidade de São Paulo. CAPES. Supervisor: Silva V.P* (2011). 44.
  11. Gardner L., Ng K.T. "Temperature development in structural stainless steel sections exposed to fire", *Fire Saf. J.*, Vol. 41 (2006) 185-203.
  12. Ding J., Wang Y.C. "Temperatures in unprotected joints between steel beams and concrete-filled tubular columns in fire". *Fire Safety Journal*, Vol. 44 (2009)16-32.
  13. Franssen J-M, Cowez B. "Consideration of local instabilities in beam finite elements". *Proceedings of the Seventh International Conference of Structures in Fire. M.Fontana, A. Frangi, M. Knobloch (Eds.). Zurich, Switzerland, (2012)* 155-164.
  14. Anderberg Y.: "SUPER-TEMPCALC. A commercial and user friendly computer program with automatic FEM-generation for temperature analysis of structures exposed to heat". *Fire Safety Design. Lund.* (1991).
  15. Silva, V. P., Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process—a simple derivation, *Engineering Structures*, Vol. 27 (2005) 2036-2043.
  16. Correia A.M, Rodrigues J.P, Silva V.P. "A simplified calculation method for temperature evaluation of steel columns embedded in walls". *Fire and Material J.*, Vol. 35 (2011) 431-441.
  17. CEN. EN 1991-1-2:2002.: "Eurocode 1: Actions on structures-part 1.2: General actions - Actions on structures exposed to fire". *European Committee for Standardization* (2004).
  18. Schleich J.B.: "Properties of the materials". In: *Implementation of Eurocodes. Design of buildings for the fire situation. Handbook 5. KICTU/CKAIT/RWTH/IET/UOP/TNO/IMK/BRE. Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007. Luxembourg* (2005) V1– V28.
  19. Anderberg Y.: "Background documentation for thermal conductivity of concrete". In: *BDA 3.1. CEN/TC250/SC2. CEN/TC 250/SC 2/PT 1-2. Doc. N 150* (2001).

Recibido el 16 de Mayo de 2012

En forma revisada el 23 de Septiembre de 2013