

Diseño de conexiones tipo perno en vigas compuestas de acero y hormigón en situación de incendio

Design of stud connections in steel – concrete composite structures in fire situation

Yisel Larrúa*, Rafael Larrúa¹*, Valdir P. Silva**

* Universidad de Camagüey, Camagüey. CUBA

** Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo. BRASIL

Fecha de Recepción: 07/08/2014

Fecha de Aceptación: 03/03/2015

PAG 39-52

Resumen

En el trabajo se aborda el estudio de los factores que inciden en la resistencia, en situación de incendio, de las conexiones tipo perno en estructuras compuestas hormigón-acero con tipología de viga y losa maciza. Se realiza el diseño del experimento, la modelación térmica de los especímenes del ensayo push-out y el análisis de significación de diferentes parámetros en las relaciones de temperatura en secciones compuestas con vigas sin revestimiento y con revestimiento contra incendio. Por último, se proponen las temperaturas a considerar en el hormigón y el conector, expresadas como porcentajes de la temperatura en el ala del perfil, para determinar los factores de reducción de la resistencia de la conexión en situación de incendio. Los resultados demuestran que los porcentajes propuestos por EN 1994-1-2 (2005) para determinar la temperatura en el hormigón y el conector a partir de la temperatura en el ala no son válidos para todas las situaciones de diseño dentro del alcance del código.

Palabras claves: Análisis térmico, estructuras compuestas, ensayo push-out, conexiones tipo perno, incendio

Abstract

This work studies the factors that impact on the fire resistance of stud connections in steel-concrete composite structures, considering beams with solid slab. The design of the experiment, the thermal modeling of the push-out specimens, with or without fire protection material, and the analysis of the significance of the different parameters in the temperature relationships are carried out. Finally, the temperatures that should be considered in the concrete and the connector, expressed as percentages of the steel flange temperature, are proposed in order to determine the reduction factors of the connection resistance in fire situation. The results demonstrate that the percentages proposed in EN 1994-1-2 (2005) to determine the temperature in the concrete and the connector, based on the temperature in the steel flange, are not valid for all design situations within the scope of the code.

Keywords: Thermal analysis, composite structures, push-out test, stud connections, fire

1. Introducción

En las estructuras compuestas de acero y hormigón ambos materiales trabajan en forma solidaria para resistir los esfuerzos externos. De los conectores empleados en la práctica constructiva internacional el perno con cabeza (*stud*) es el más utilizado debido a las ventajas que presenta en cuanto a su fácil colocación y rapidez en la operación.

El estudio del comportamiento de las vigas compuestas de acero y hormigón en situación de incendio es complejo debido a los diferentes materiales que las componen. Cuando una viga compuesta es sometida al fuego, tanto el perfil de acero como la losa de hormigón están expuestos directamente, sin embargo los conectores de cortante son calentados indirectamente por el calor transferido por el ala del perfil. Para garantizar la seguridad estructural, en muchas ocasiones la estructura metálica necesita estar revestida por materiales que retarden la acción del fuego sobre ella.

Internacionalmente, se han desarrollado numerosos 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.

1. Introduction

In steel-concrete structures, both materials work jointly to resist external stresses. The stud is the most used connector in the international construction practice, due to its easy placing and fast operation.

The study of the behavior of steel-concrete beams in fire situations is complex because of the different materials that compose them. When a composite beam is subjected to fire, both the steel profile and the concrete slab are directly exposed; however, shear connectors are indirectly heated through the heat transferred by the steel flange. In order to guarantee the structural safety, the metallic structure often needs to be encased by materials that can delay the action of fire upon them.

Internationally, several connector tests have been performed, usually called *push-out tests*, to evaluate the strength and load-displacement behavior of the connections at room temperature, mainly related to stud connections.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:

Profesor Titular, Director del Centro de Estudio de Estructuras y Sistemas Constructivos (CENDES) de la Universidad de Camaguey, Cuba.
E-mail: rafael.larrua@reduc.edu.cu



Contrastando con la gran cantidad de ensayos push-out llevados a cabo a temperatura ambiente, se han realizado un número reducido del propio tipo de ensayo en situación de incendio. En 1992, se realizaron los primeros ensayos de conexiones a elevadas temperaturas en el Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM), Francia (Kruppa y Zhao, 1995). 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 EN 1994-1-2 (2005).

Recientemente se han realizado nuevos ensayos de conexiones tipo perno a elevadas temperaturas, entre los que sobresalen dos programas experimentales desarrollados en la región asiática (Satoshi et al., 2008; Chen et al., 2012). En general, se puede afirmar que los programas experimentales realizados hasta el presente cuentan con la limitación de no abarcar todas las situaciones de diseño declaradas en los alcances de EN 1994-1-1 (2004) y EN 1994-1-2 (2005).

Investigaciones anteriores (Larrúa y Silva, 2013a, 2013b) demostraron que los porcentajes propuestos por EN 1994-1-2 (2005) para determinar la temperatura en el hormigón y el conector a partir de la temperatura en el ala del perfil no son válidos para todas las situaciones de diseño dentro del alcance del código, para el caso de vigas sin revestimiento contra incendio. En tal sentido fueron propuestos nuevos porcentajes, que toman en cuenta la altura del conector, a partir de los valores medios de las relaciones θ_c/θ_f (temperatura promedio en el hormigón entre la temperatura promedio del ala del perfil) y θ_s/θ_f (temperatura en el conector entre la temperatura promedio del ala del perfil) en el intervalo de 0-90 minutos de exposición al fuego. Estos autores incluyen la determinación de la temperatura del hormigón en dos niveles, $0.5h_{sc}$ que coincide con el nivel considerado, a partir de datos experimentales, en la determinación de la formulación actual de EN 1994-1-2 (2005) y $0.25h_{sc}$, que tiene como base estudios precedentes del mecanismo de fallo de conexiones a temperatura ambiente y también la coincidencia de las mayores temperaturas en la región cercana a la parte inferior de la losa.

Debe considerarse que una viga sin revestimiento contra incendio sometida a elevadas temperaturas falla por otras razones ajenas al fallo específico de la conexión, en un entorno de trabajo máximo de alrededor de 30 minutos. Sin embargo, como el espécimen *push-out* es un modelo simplificado del comportamiento real de la viga compuesta, los factores que limitan el fallo de la viga compuesta no revestida, no se ponen de manifiesto y el fallo de la conexión se produce a tiempos de exposición al fuego muy por encima de 30 minutos (Kruppa y Zhao, 1995).

Por ende, en el presente estudio se da continuidad a los resultados de Larrúa y Silva (2013a, 2013b) antes comentados y se proponen las temperaturas a considerar en el hormigón y el conector, expresadas como porcentajes de la temperatura en el ala del perfil, para dos alternativas: vigas metálicas sin revestimiento contra incendio (SR), en las que se incorpora el análisis de su rango usual de trabajo (0-30 minutos), y vigas metálicas con revestimiento contra incendio (CR), hasta el momento no abordadas.

Compared with the large number of push-out tests performed at room temperature, a reduced number of similar tests have been carried out in fire situation. In 1992, the first high-temperature connection tests in the world were made at the Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM), France (Kruppa and Zhao, 1995). The results of this relevant research served as a base for establishing design criteria for stud connections in fire situation, recommended in EN 1994-1-2 (2005).

Recently, new stud connection tests at high temperatures have been performed, among which two experimental programs carried out in the Asian region can be highlighted (Satoshi et al., 2008; Chen et al., 2012). In general, the experimental programs performed to date are limited by the fact of not covering all the design situations stated in the scope of EN 1994-1-1 (2004) and EN 1994-1-2 (2005).

Former researches (Larrúa & Silva, 2013a, 2013b) demonstrated that the percentages proposed in EN 1994-1-2 (2005) to determine the temperature in the concrete and the connector based on the steel flange temperature are not valid for all design situations within the scope of the code for beams without fire protection. Therefore, new percentages were proposed, which take into account the connector height, based on the average values of the ratios θ_c/θ_f (average concrete temperature to average steel flange temperature) and θ_s/θ_f (connector temperature to average steel flange temperature) at the fire exposure interval of 0-90 minutes. These authors include the determination of the concrete temperature in two levels; $0.5h_{sc}$, which is consistent with the level considered, from experimental data, in the determination of the current formulation of EN 1994-1-2 (2005); and $0.25h_{sc}$, based on former studies on failure mechanisms of stud connections at room temperature, and also the coincidence of higher temperatures in the area close to the lower part of the slab.

It should be considered that a beam without fire protection subjected to high temperatures presents failure due to reasons other than the specific failure of the stud connection, in a maximum work environment of approximately 30 minutes. However, considering that the push-out specimen is a simplified model of the real behavior of the composite beam, the factors that limit the failure of the unencased composite beam are not evidenced, and the connection failure is produced at fire exposure times far above 30 minutes (Kruppa and Zhao, 1995).

Therefore, the present study gives continuity to the results of Larrúa and Silva (2013a, 2013b) mentioned earlier, and proposes the temperatures to be considered in the concrete and the connector, expressed as percentages of the temperature in the steel flange, for two alternatives: steel beams without fire protection, which incorporated the analysis of its usual work range (0-30 minutes), and steel beams with fire protection, which have not been dealt with until now.



2. Modelación térmica

La modelación numérica es una herramienta ampliamente utilizada en la solución de problemas de ingeniería estructural en situación de incendio. 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 (Anderberg, 1991; Silva, 2005; Correia et al., 2011). Este programa pertenece a la familia de las aplicaciones de modelación bidimensional basadas en el método de los elementos finitos. La presente sección se dedica a exponer los criterios seguidos en la modelación térmica del ensayo *push-out* de las conexiones tipo perno en vigas compuestas de acero y hormigón, con el citado programa de cómputo, para secciones de acero sin revestimiento y con revestimiento contra incendio.

2.1 Acciones térmicas

El flujo neto de calor está dado por la suma del flujo neto por convección, controlado por el coeficiente de convección (α_c), y el flujo neto por radiación, controlado por la emisividad resultante (ϵ_r). El desarrollo de las temperaturas del espécimen en el horno depende de la emisividad del material (ϵ_m) y la emisividad del fuego (ϵ_f). La emisividad resultante es generalmente aproximada al producto de ϵ_m y ϵ_f . En EN 1994-1-2 (2005) y EN 1991-1-2 (2002) la emisividad del fuego es tomada usualmente como 1. EN 1994-1-2 (2005) 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 (1990), con el coeficiente de convección (α_c) igual a 25 W/m²K, y con emisividad resultante igual a 0.7, según lo definido en EN 1991-1-2 (2002) para la propia curva de fuego estándar. En las partes no expuestas se considera la acción de la temperatura ambiente de 20°C con un coeficiente de convección de 9 W/m²K.

2.2 Propiedades térmicas de los materiales

Se sigue el enfoque de considerar las propiedades térmicas de los materiales recomendadas en EN 1994-1-2 (2005), 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.

La conductividad térmica y el calor específico de acero se asumen como propiedades dependientes de la temperatura, de acuerdo con EN 1994-1-2 (2005). Siguiendo lo establecido por el propio código se toma un valor de densidad independiente de la temperatura igual a 7850 kg/m³.

La conductividad térmica del hormigón de peso normal, de acuerdo con EN 1994-1-2 (2005), es también una propiedad dependiente de la temperatura y debe determinarse entre el límite superior y el límite inferior definidos en ese código (EN 1994-1-2, 2005; Schleich, 2005; Anderberg 2001). 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/m³.

2. Thermal analysis

The numerical modeling is a widely used tool for solving structural engineering problems in fire situations. In turn, several previous studies demonstrate the efficacy of the software SuperTempcalc (Temperature Calculation and Design v.5) developed by FSD (Fire Safety Design, Sweden) when modeling heat transfer problems in structural engineering (Anderberg, 1991; Silva, 2005; Correia et al., 2011). This software belongs to the family of bidimensional modeling applications based on the finite element method. The present section aims at describing the criteria followed in the thermal analysis of the push-out test for stud connections in steel-concrete composite beams, with the mentioned calculation software, for steel sections with and without fire protection.

2.1 Thermal actions

The net heat flux is given by the sum of the convective net flux controlled by the convection coefficient (α_c), and the radiation net flux, controlled by the resulting emissivity (ϵ_r). The development of the specimen temperatures in the furnace depends on the material's emissivity (ϵ_m) and the fire emissivity (ϵ_f). The resulting emissivity is usually approximated to the product of ϵ_m and ϵ_f . In EN 1994-1-2 (2005) and EN 1991-1-2 (2002) the fire emissivity is usually taken as 1. EN 1994-1-2 (2005) considers that the emissivity of steel and concrete related to the surfaces of the members is 0.7.

In the understanding of the developed modeling, the exposed parts of the section are considered under the ISO 834 (1990) fire standard, with the convection coefficient (α_c) of 25 W/m²K and the resulting emissivity of 0.7, according to the definitions in EN 1991-1-2 (2002) for standard fire curve. In the non-exposed parts, the action of the 20°C room temperature is considered with a convection coefficient of 9 W/m²K.

2.2 Materials thermal properties

The followed approach considers the materials' thermal properties recommended in EN 1994-1-2 (2005), with the intention of developing more universal models based on standardized properties that can be used creatively in the study of different similar design situations.

The steel thermal conductivity and specific heat are assumed as properties depending on temperature, according to EN 1994-1-2 (2005). Based on the code, a density value independent from temperature of 7850 kg/m³ is adopted.

The thermal conductivity of normal weight concrete, according to EN 1994-1-2 (2005) is also a property depending on temperature and must be assessed between the upper and lower limit defined in that code (EN 1994-1-2, 2005; Schleich, 2005; Anderberg 2001). On the other hand, the specific heat of normal weight concrete was included as a property dependent on temperature, inasmuch as the density of this material is taken as a value independent from temperature in the interval between 2300-2400 kg/m³.



2.3 Modelación de la geometría

El dominio es coincidente con la sección transversal del espécimen push-out de Kruppa y Zhao (1995). Se incluye cuando procede, el material de revestimiento contra incendio. La Figura 1 muestra dos ejemplos ilustrativos de las alternativas consideradas, vigas sin revestimiento contra incendio y vigas revestidas.

2.3 Geometric modeling

The domain is consistent with the push-out specimen's cross section of Kruppa and Zhao (1995). When it is appropriate, the fire resistant encasement material is included. Figure 1 illustrates two examples of the alternatives considered: beams without fire protection and encased beams.

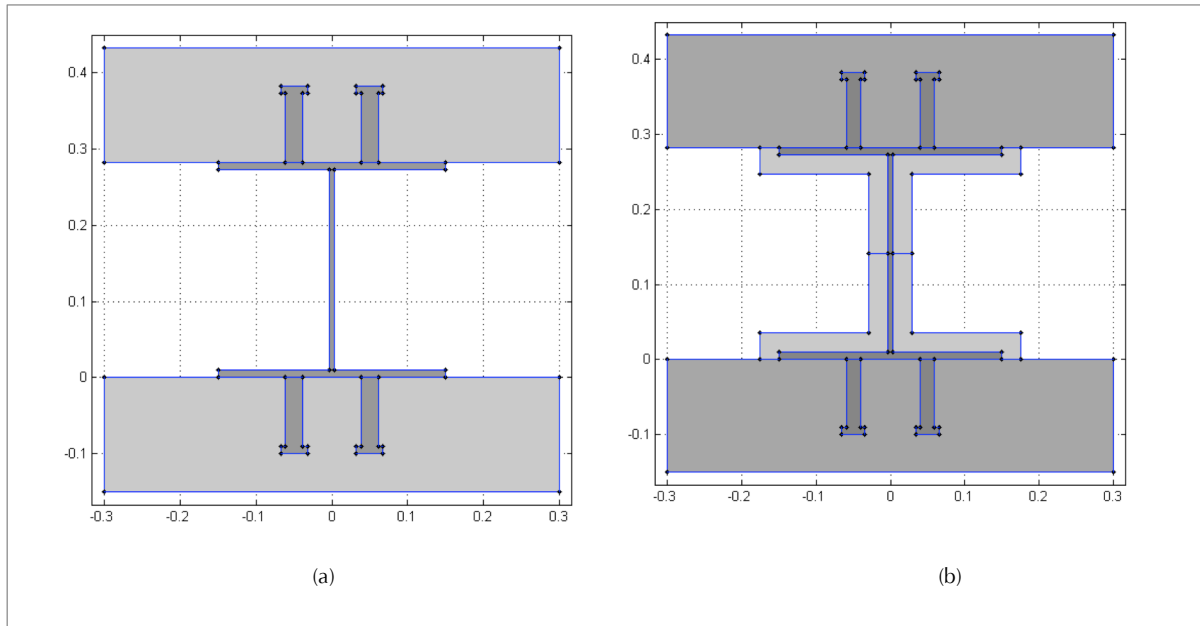


Figura 1. Modelación de la geometría. a) Viga sin revestimiento contra incendio. b) Viga con revestimiento contra incendio (espesor de 25 mm)
Figure 1. Geometric modeling. a) Beam without fire protection. b) Beam with fire protection (thickness of 25 mm)

2.4 Modelación de las condiciones de frontera

La definición de las condiciones de frontera, tal como indica la Figura 2, incluye el contorno 1 sobre el que se considera actuando el fuego estándar ISO 834 (1990), mientras que el contorno 2 representa la región no expuesta, en la que actúa la temperatura ambiente (20°C).

2.4 Modeling of the boundary conditions

The definition of boundary conditions, as indicated in Figure 2, includes boundary 1 upon which standard fire ISO 834 (1990) is acting, while boundary 2 represents the unexposed region, where room temperature prevails (20°C).

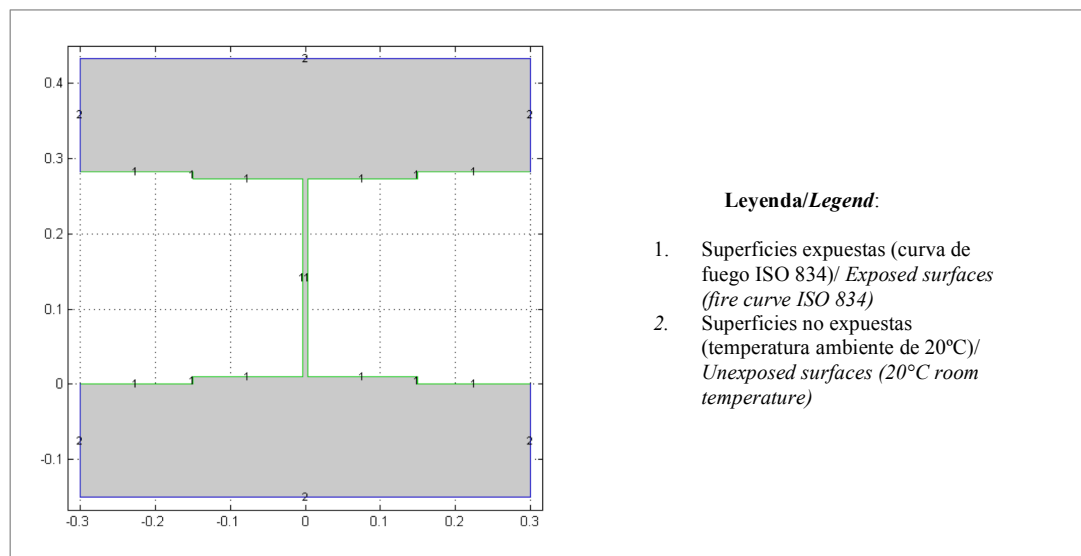


Figura 2. Condiciones de frontera
Figure 2. Boundary conditions

2.5 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, la malla se generó con elementos rectangulares de cuatro nodos. El tamaño del lado mayor de los elementos se definió como $l \leq 0.01$ m. Por necesidades prácticas de medición de puntos de temperatura se opta por hacer un refinamiento localizado de 0.005 m que permite obtener la temperatura en esos puntos específicos evitándose un refinamiento global. La Figura 3 muestra como ejemplo la discretización en un espécimen no revestido.

2.5 Selection of the finite element type and the grid density

Due to the fact that the cross section of the specimens is formed by rectangular geometries, the grid was generated with rectangular elements of four nodes. The size of the larger side of the elements was defined as $l \leq 0.01$ m. For practical reasons concerning the measurement of temperature points, a localized refinement of 0.005 m was decided, which allows obtaining the temperature in those specific points, thus avoiding a global refinement. Figure 3 shows the example of the discretization for an unencased specimen.

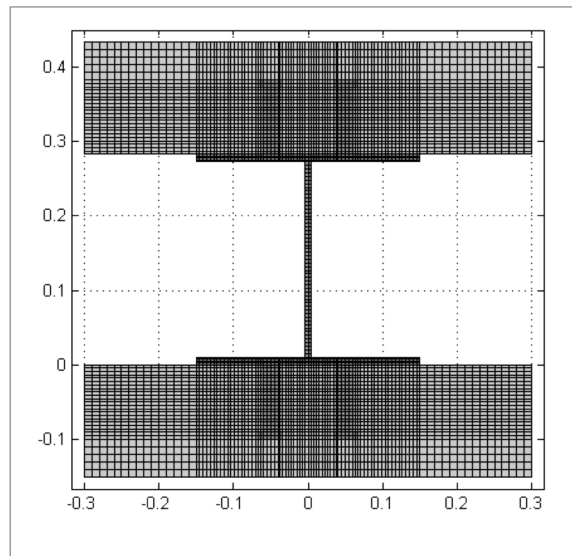


Figura 3. Discretización del dominio
Figure 3. Discretization of the domain

2.6 Obtención de los resultados

El programa de computación ofrece la posibilidad de obtener los resultados en diferentes formatos: gráficos, tablas de Microsoft Excel y/o animaciones. Dentro de los gráficos se encuentran los campos de temperatura que permiten apreciar a través de los tonos policromáticos asociados a una escala de colores, la distribución de las temperaturas en el dominio para un tiempo de exposición al fuego dado.

La Figura 4 muestra los campos de temperatura a 30 minutos de exposición a fuego de especímenes correspondientes a las dos alternativas consideradas, sin revestimiento contra incendio y con revestimiento (de 25 mm de espesor). Se pueden apreciar las diferencias marcadas en el comportamiento térmico de ambos casos.

2.6 Results recording

The software offers the possibility of obtaining results in different formats: graphs, Microsoft Excel tables and/or animations. Temperature fields are among the graphs, which allow appreciating, through the polychromatic shades associated to a color scale, the distribution of temperatures in the domain for a given fire exposure time.

Figure 4 shows the temperature fields at 30 minutes of fire exposure of the specimens corresponding to the two alternatives considered, without fire protection and with fire protection (25 mm thick). Marked differences in the thermal behavior of both cases can be observed.

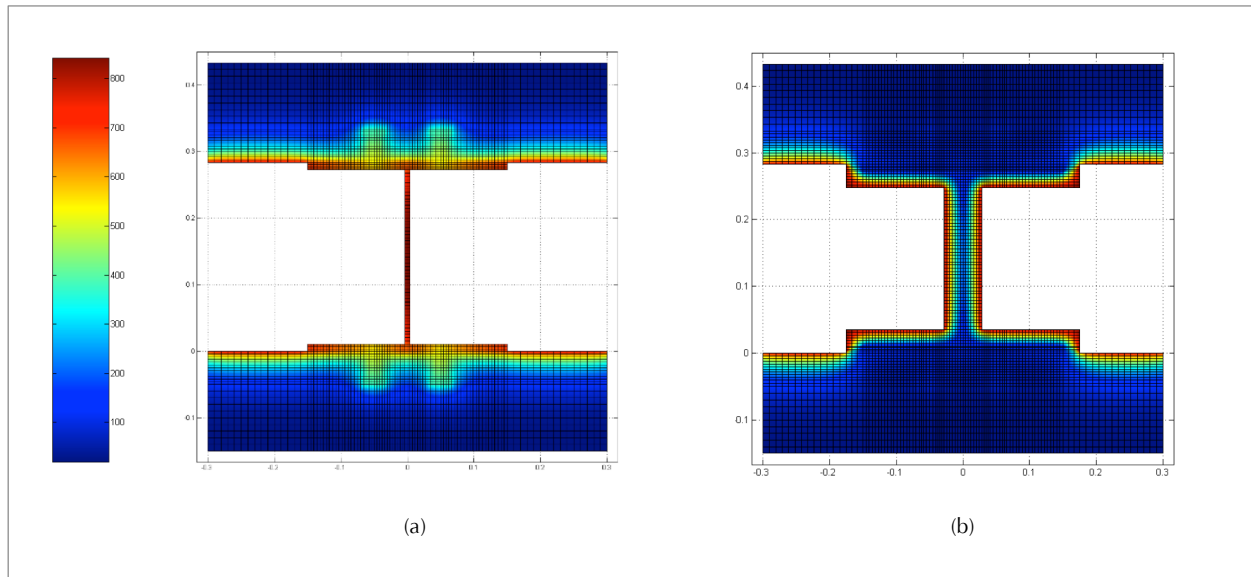


Figura 4. Campos de temperatura a 30 minutos de exposición al fuego. a) Espécimen sin revestimiento contra incendio. b) Espécimen con revestimiento contra incendio

Figure 4. Temperature fields at 30 minutes of fire exposure. a) Specimen without fire protection. b) Specimen with fire protection

3. Vigas sin revestimiento contra incendio

3.1 Diseño del experimento numérico

Se realiza el diseño de experimento para poder determinar la influencia de la altura del conector, la densidad, la conductividad y la humedad del hormigón en el comportamiento de las relaciones θ_{sc}/θ_f y θ_c/θ_p , para el intervalo de tiempo de exposición al fuego de 0-30 minutos.

El experimento para vigas sin revestimiento contra incendio consiste en un diseño factorial con dos factores (con tres niveles cada uno) y dos factores (con dos niveles cada uno). En la Tabla 1 se muestran las variables estudiadas y sus respectivos niveles. La conductividad térmica del hormigón se evalúa para los límites inferior (LI) y superior (LS) planteados en EN 1994-1-2 (2005), pues aunque en este código se sugiere el límite superior (LS) para las estructuras compuestas, las características de los ensayos realizados para establecer tal límite, difieren de las del caso de estudio del presente trabajo.

3. Beams without fire protection

3.1 Numerical experiment design

The purpose of the experiment design is to define the influence of the connector height, density, conductivity and moisture content of concrete on the behavior of the ratios θ_{sc}/θ_f and θ_c/θ_p , for the interval of 0-30 minute of fire exposure time.

The experiment for beams without fire protection consists of a factorial design with two factors (with three levels each) and two factors (with two levels each). Table 1 shows the studied variables and their respective levels. The thermal conductivity of concrete is assessed for the lower (LL) and upper limits (UL) set out in EN 1994-1-2 (2005), because although this code suggests the upper limit (UL) for composite structures, the characteristics of the tests performed to establish that limit differ from the present work's case study.

Tabla 1. Diseño numérico experimental para vigas sin revestimiento contra incendio

Table 1. Numerical experiment design for beams without fire protection

Variables	Niveles/ Levels		
Densidad/ Density (kg/m ³)	2300	2350	2400
Altura/ Height (mm)	50		100
Conductividad térmica/ Thermal Conductivity (W/mK)	LI		LS
Humedad/Moisture Content (%)	1,5	4,25	7

3.2 Determinación de las relaciones θ_{sc}/θ_f y θ_c/θ_f

Se obtuvo la temperatura en la base del conector (θ_{sc}), la temperatura promedio del ala superior del perfil (θ_f) y la temperatura promedio del hormigón en la vecindad del conector (θ_c), a partir de valores de temperatura-tiempo tomados en diferentes puntos de la sección transversal del espécimen *push-out*. θ_f se consideró como el promedio de la temperatura medida en cinco puntos de la misma, θ_{sc} se tomó en el borde del conector a una altura de 5 mm medida desde el borde superior del ala, θ_c como el promedio de seis puntos medidos al nivel de la mitad de la altura del conector ($0.50h_{sc}$) y como el promedio de seis puntos medidos al nivel de un cuarto de la altura del conector ($0.25h_{sc}$) desde su base. Se calcularon las relaciones θ_{sc}/θ_f y θ_c/θ_f para cada uno de los especímenes y se obtuvieron sus curvas de comportamiento en función del tiempo de exposición al fuego.

3.3 Evaluación de la significación de los factores

A partir de la matriz de resultados, derivada del diseño estadístico del experimento, se realizan diversos análisis estadísticos con la ayuda del paquete informático STATGRAPHICS Centurion XV Versión 15.2.06.

El estudio paramétrico determinó que la altura del conector (h_{sc}) es la variable independiente que tiene mayor influencia en las relaciones de temperatura y que es posible obtener un elevado nivel de ajuste al definir ecuaciones en función de esa variable para predecir las relaciones estudiadas, con coeficientes de determinación múltiple (R^2) entre 92.62 y 95.28 %.

En la Figura 5 se ilustra la influencia de la altura del conector en las relaciones de temperatura, para un tiempo de exposición al fuego de 0-30 minutos, de dos especímenes sin revestimiento, SR-A y SR-B, con altura del conector igual a 50 mm y 100 mm respectivamente. Ambos poseen densidad igual a 2400 kg/m^3 , humedad del 1.5 % y límite superior de conductividad térmica (LS). Se puede observar que la altura del conector influye notablemente en las relaciones θ_c/θ_f , para los dos niveles considerados y la propia variable tiene poca influencia en la relación θ_{sc}/θ_f .

3.2 Determination of the ratios θ_{sc}/θ_f and θ_c/θ_f

The temperature at the base of the connector (θ_{sc}), the average temperature of the upper steel flange (θ_f), and the average temperature of concrete near the connector (θ_c) were measured, based on temperature-time values measured at different points of the cross section of the push-out specimen. θ_f was considered as the average of the temperature measured at five points, θ_{sc} was measured at the edge of the connector at a height of 5 mm measured from the upper edge of the flange, θ_c was measured as the average of six points measured at the mid-height level of the connector ($0.50h_{sc}$) and as the average of six points measured at the one quarter-height level from the base of the connector ($0.25h_{sc}$). The ratios θ_{sc}/θ_f and θ_c/θ_f were calculated for each specimen, and their behavior curves were obtained based on fire exposure time.

3.3 Analysis of the significance of factors

Based on the result matrix, derived from the experiment's statistical design, several statistical analysis were carried out with the help of the software STATGRAPHICS Centurion XV Version 15.2.06.

The parametrical study determined that the connector height (h_{sc}) is the independent variable that has most influence on temperature relationships, and that it is possible to obtain a high level of adjustment when defining equations based on that variable to predict the studied relationships, with multiple coefficients of determination (R^2) between 92.62 and 95.28%.

Figure 5 illustrates the influence of the connector height on temperature relationships, for a 0-30 minute fire exposure time, of two unencased specimens, SR-A and SR-B, with connector height of 50 mm and 100 mm, respectively. Both have a density of 2400 kg/m^3 , moisture content of 1.5% and upper limit of thermal conductivity (UL). It can be observed that the connector height has a significant influence on the ratios θ_c/θ_f , for the two levels considered, and the same variable has an insignificant influence on the ratio θ_{sc}/θ_f .

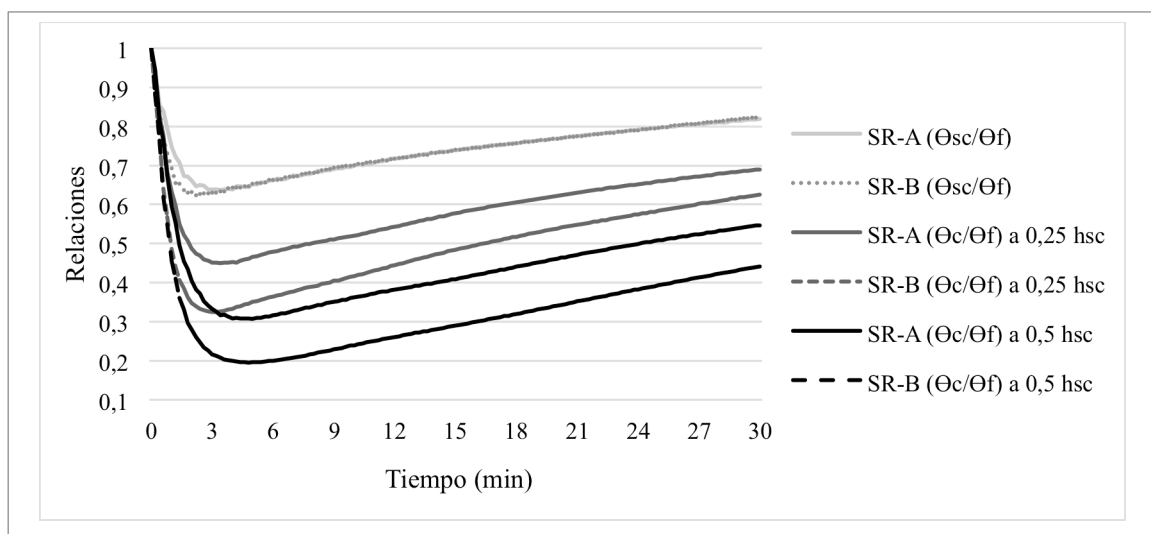


Figura 5. Influencia de la altura del conector (h_{sc}) en las relaciones de temperatura
Figure 5. Influence of the connector height (h_{sc}) on temperature relationships



En un análisis de sensibilidad realizado por Larrúa y Silva (2013a, 2013b) se demostró que la evolución de las temperaturas se predice con mayor efectividad, respecto a los resultados experimentales disponibles (Kruppa y Zhao, 1995), cuando se toma la densidad igual a 2300 kg/m³, el contenido de humedad igual a 1.5 % y para la conductividad térmica del hormigón se adopta el límite superior (LS), en correspondencia con la recomendación de EN 1994-1-2 (2005).

Por otra parte, cabe comentar que los programas experimentales desarrollados por Satoshi et al. (2008) y Chen et al. (2012) incluyen diferencias sustanciales respecto a los ensayos llevados a cabo en el CTICM. Satoshi et al. (2008) ensayaron especímenes con una sola losa de hormigón, con carga constante, en tanto Chen et al. (2009) ensayaron especímenes con dos losas que, a diferencia de los casos anteriores, son llevados hasta la rotura cuando se alcanzan niveles de temperatura predeterminados. En ambos casos se utilizan curvas de fuego diferentes al fuego estándar ISO 834, lo que genera un calentamiento de los especímenes mucho más lento de los especímenes y sus partes componentes.

Los autores del presente artículo realizaron modelos numéricos considerando las geometrías y curvas de fuego reportadas en los programas experimentales asiáticos antes comentados, tomando en cuenta además las propiedades térmicas que para el hormigón adopta EN 1994-1-2 (2005). Pudo verificarse que el ajuste entre los resultados numéricos y experimentales es sensiblemente menor que el exhibido por los modelos del programa del CTICM antes comentado, lo que es consecuencia de la falta de correspondencia entre las curvas de fuego consideradas por Satoshi et al. (2008) y Chen et al. (2012) y las propiedades térmicas del hormigón incorporadas a los modelos, dado que estas se derivaron de extrapolaciones numéricas con base en temperaturas medidas en ensayos de elementos estructurales sometidos al fuego estándar ISO 834 (1990).

Por tales razones, en todo lo que sigue se modelan especímenes del programa del CTICM con las características finales antes descritas. Se consideran diferentes alturas del conector (50 mm, 60 mm, 75 mm, 90 mm, 100 mm y 125 mm) y se determinan las relaciones de temperatura para el rango de 0-30 minutos. La Tabla 2 muestra los resultados de las relaciones definitivas que se proponen para el cálculo simplificado, expresadas en porcentajes, para el rango de trabajo estudiado.

A sensitivity analysis carried out by Larrúa and Silva (2013a, 2013b) shows that the temperature development is best predicted, in relation to the available experimental results (Kruppa and Zhao, 1995), when taking density of 2300 kg/m³, moisture content of 1.5 %, and when the upper limit is adopted in the assessment of the thermal conductivity of concrete, in accordance with the recommendation of EN 1994-1-2 (2005).

On the other hand, it should be noted that the experimental programs developed by Satoshi et al. (2008) and Chen et al. (2012) include substantial differences in relation to the tests carried out at the CTICM. Satoshi et al. (2008) tested specimens with a single concrete slab, with constant load, while Chen et al. (2009) tested specimen with two slabs that, unlike former cases, are brought to failure when predetermined temperature levels are reached. Both cases apply fire curves different from standard fire ISO 834, which generated a much slower heating of the specimens and their components.

The authors of the present paper performed numerical models considering the geometries and fire curves reported in the Asian experimental programs already mentioned, and they also took into account the thermal properties adopted for concrete by EN 1994-1-2 (2005). It was possible to verify that the adjustment between the numerical and experimental results is notably less than in the models of the CTICM program mentioned earlier. This is a consequence of the lack of correspondence between the fire curves considered by Satoshi et al. (2008) and Chen et al. (2012) and the thermal properties of concrete incorporated to the models, since they were derived from numerical extrapolations based on temperatures measured in structural member tests subjected to standard fire ISO 834 (1990).

Therefore, specimens of the CTICM program are modeled hereon with the final characteristics described above. Different connector heights are considered (50 mm, 60 mm, 75 mm, 90 mm, 100 mm and 125 mm) and the temperature relationships are calculated for the 0-30 minute range. Table 2 shows the results of the definite ratios proposed for the simplified calculation, expressed in percentages, for the studied work range.

Tabla 2. Relaciones de temperatura θ_{sc}/θ_f y θ_c/θ_f para un rango de trabajo de 0-30 minutos, en vigas sin revestimiento contra incendio
Table 2. Temperature ratios θ_{sc}/θ_f and θ_c/θ_f for a work range of 0-30 minutes, in beams without fire protection

Altura del conector/ Connector Height (mm)	θ_{sc}/θ_f (%)	θ_c/θ_f a/to 0.25 h_{sc} (%)	θ_c/θ_f a/to 0.5 h_{sc} (%)
50	75	60	45
60		55	40
75		50	35
90		45	30
100		45	30
125		40	25



Para el rango de trabajo de 0-30 minutos se puede observar que los porcentajes para determinar la temperatura en el hormigón varían en función de la altura del conector. Esto ratifica que el porcentaje propuesto por EN 1994-1-2 (2005), igual a 40 %, para determinar la temperatura en el hormigón no es válido para todas las situaciones de diseño dentro del alcance del código y coincide con los resultados obtenidos por Larrúa y Silva (2013b), para el rango de trabajo de 0-90 minutos. A su vez, se hace notar que los porcentajes ajustados al rango de trabajo de 0-30 minutos difieren de los determinados con anterioridad por dichos autores para el rango de trabajo de 0-90 minutos. (Larrúa y Silva, 2013b)

En resumen, para vigas sin revestimiento contra incendio, se recomienda utilizar los valores de las relaciones correspondientes al rango de 0-30 minutos, con la particularidad de hacer uso, en el caso del hormigón, de los valores determinados a $0.25h_{sc}$ (ver Tabla 2), tomando en cuenta los fundamentos antes expuestos.

4. Vigas con revestimiento contra incendio

4.1 Diseño del experimento numérico

Se realiza el diseño del experimento numérico para estudiar los factores que influyen en las relaciones de temperatura θ_{sc}/θ_f y θ_c/θ_p , en secciones compuestas con vigas con revestimiento contra incendio (CR). La variable con más influencia en las relaciones de temperatura para la sección compuesta con vigas sin revestimiento, resultó ser la altura del conector, debido a lo cual se considera también como un factor de estudio en este experimento. Se consideran rangos de valores de conductividad y capacitancia representativos de una amplia gama de materiales de revestimiento usualmente empleados en la práctica internacional y los criterios seguidos por Wang (1998).

Para el diseño estadístico del experimento numérico y el análisis de los resultados, también fue utilizado el programa Statgraphics XV Centurion. Se implementó un diseño factorial multinivel para evaluar el efecto de los factores seleccionados, que arrojó un total de 54 combinaciones. Posteriormente, se realizó la optimización del diseño, utilizando los procedimientos incluidos en el citado programa, con lo que quedaron definidas, finalmente, 16 combinaciones. En la Tabla 3 se muestran las variables estudiadas y sus respectivos niveles.

For the 0-30 minute work range, it can be observed that the percentages to determine the concrete temperature vary based on the connector height. This confirms that the percentage of 40% proposed by EN 1994-1-2 (2005) to determine the concrete temperature is not valid for all design situations within the scope of the code, and it is consistent with the results obtained by Larrúa and Silva (2013b) for the work range of 0-90 minutes. In turn, it should be noted that the percentages adjusted by the 0-30 minute work range differ from those calculated earlier by these authors for the 0-90 minute work range. (Larrúa and Silva, 2013b).

In brief, for beams without fire protection, it is recommendable to use the values of the ratios corresponding to the 0-30 minute range, with the specification of using the values calculated at $0.25h_{sc}$ for concrete (see Table 2), taking the aforementioned grounds into account.

4. Beams with fire protection

4.1 Numerical experiment design

The purpose of the numerical experiment design is to study the factors that have an influence on the temperature ratios θ_{sc}/θ_f and θ_c/θ_p , in composite sections with beams with fire protection. The variable that had the biggest influence on the temperature relationships for the composite section with beams without fire protection, was the connector height; therefore, it is also considered as a study factor in the experiment, which includes representative conductivity and capacitance values of a wide range of protection materials that are usually employed in the international practice and the criteria followed by Wang (1998).

For the statistical design of the numerical experiment and the analysis of results, the software Statgraphics XV Centurion was also used. A multilevel factorial design was implemented to assess the effect of the selected factors, which generated a total of 54 combinations. Later on, the design optimization was performed, using the procedures included in the software, thereby defining 16 combinations. Table 3 shows the studied variables and their respective levels.

Tabla 3. Diseño estadístico del experimento para vigas con revestimiento contra incendio

Table 3. Statistical design of the experiment for beams with fire protection

Variables	Niveles/Levels		
Espesor del revestimiento contra incendio/ Thickness of fire protection (mm)	10	25	40
Conductividad térmica del revestimiento/ Thermal conductivity of fire protection (W/mK)	0.1	0.2	0.3
Altura del conector/ Connector height (mm)	50		100
Capacitancia del revestimiento/ Fire protection capacitance (J/m ³ K)	250000	625000	1000000



4.2 Determinación gráfica y numérica de las relaciones θ_{sc}/θ_f y θ_c/θ_f

Para la determinación de las relaciones se siguió el mismo procedimiento descrito en epígrafe 3.2 para vigas sin revestimiento contra incendio. En el caso de las vigas revestidas se determinaron las relaciones de temperatura para 4 rangos de tiempo de exposición al fuego: 0-30 minutos, 0-60 minutos, 0-90 minutos y 0-120 minutos.

4.3 Evaluación de la significación de los factores

Se realiza el análisis estadístico de los resultados, para los rangos de trabajos antes mencionados, con la ayuda del paquete informático STATGRAPHICS Centurion XV Versión 15.2.06

Se realizó el análisis de significación de las variables independientes para un 95 % de confianza. De igual forma que para la sección compuesta con vigas sin revestimiento contra incendio, la altura del conector es un factor significativo en las relaciones de temperatura, y es el que más influye en la relación θ_c/θ_f . Otro factor que influye en gran medida, es el espesor del revestimiento y es el de mayor significación en la relación θ_{sc}/θ_f . La conductividad influye en las tres variables, pero en menor medida. A menor conductividad, mayores valores de las relaciones.

Para ilustrar la influencia de la altura del conector en las relaciones, en la Figura 6 se grafican las relaciones de temperatura θ_{sc}/θ_f y θ_c/θ_f a $0.25h_{sc}$, del espécimen con revestimiento CR-A con altura del conector igual a 100 mm y del espécimen CR-B con altura del conector igual a 50 mm, ambos con espesor del revestimiento contra incendio igual a 10 mm, capacitancia igual a $625000 \text{ J/m}^3\text{K}$ y conductividad igual a 0.3 W/mK .

4.2 Graphical and numerical determination of the ratios θ_{sc}/θ_f and θ_c/θ_f

For the determination of the ratios, the same procedure described in paragraph 3.2 was followed, in relation to beams without fire protection. In the case of encased beams, temperature ratios for 4 fire exposure time ranges were determined: 0-30 minutes, 0-60 minutes, 0-90 minutes and 0-120 minutes.

4.3 Analysis of the significance of factors

A statistical analysis of results is made, for the work ranges mentioned above, with the help of the software STATGRAPHICS Centurion XV Version 15.2.06.

An analysis of significance of the independent variables for a 95% confidence was made. As in the composite section with beams without fire protection, the connector height is a significant factor in temperature relationships, and it is the one that has most influence on the ratio θ_c/θ_f . Another factor having a relevant influence is the thickness of the fire protection, and it is the most significant factor in the ratio θ_{sc}/θ_f . Conductivity has an influence on all three variables, but to a lesser extent. The lower the conductivity, the higher the ratio values.

In order to graphically illustrate the influence of the connector height on the ratios, Figure 6 shows the temperature ratios θ_{sc}/θ_f and θ_c/θ_f at $0.25 h_{sc}$, of the specimen with fire protection CR-A with connector height of 100 mm, and of the specimen CR-B with connector height of 50 mm, both with fire protection thickness of 10 mm, capacitance of $625000 \text{ J/m}^3\text{K}$ and conductivity of 0.3 W/mK .

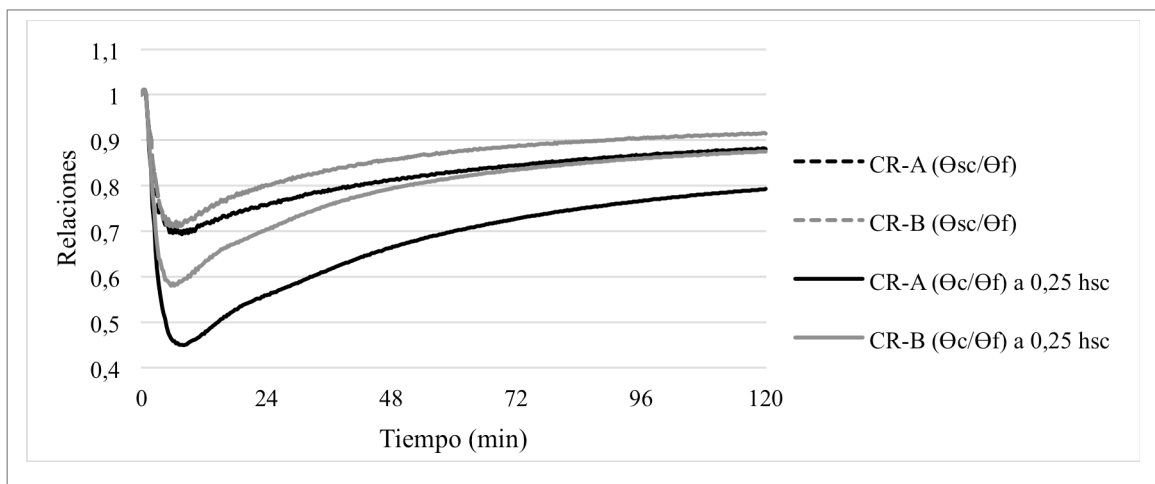


Figura 6. Influencia de la altura del conector en las relaciones de temperatura θ_{sc}/θ_f y θ_c/θ_f a $0.25h_{sc}$
Figure 6. Influence of the connector height on the temperature ratios θ_{sc}/θ_f and θ_c/θ_f at $0.25 h_{sc}$

Puede apreciarse claramente que la altura del conector influye de forma significativa en las dos relaciones, aunque en menor medida en la relación θ_{sc}/θ_f . Las relaciones de temperatura serán mayores a medida que disminuya la altura del conector.

It can be clearly appreciated that the connector height has a significant influence on both ratios, although to a lesser extent on the ratio θ_{sc}/θ_f . Temperature ratios are higher as the connector height is reduced.

En la Figura 7 se puede apreciar como influye significativamente el espesor del revestimiento contra incendio en las relaciones de temperatura de dos especímenes, el espécimen CR-C con espesor de 40 mm y el espécimen CR-D con espesor de 10 mm, ambos con h_{sc} igual a 100 mm, capacitancia del material de revestimiento igual a 625000 J/m³K y conductividad igual a 0.1 W/mK.

Nótese que en los primeros 30 minutos, el comportamiento de las relaciones para el espécimen que tiene espesor de revestimiento de 40 mm es acentuadamente diferente y los valores de las relaciones son notablemente superiores a los obtenidos con el modelo de espesor menor.

Figure 7 shows how the fire protection thickness has a significant influence on the temperature ratios of two specimens, the CR-C specimen with 40 mm thickness and the CR-C specimen with 10 mm thickness, both with h_{sc} of 100 mm, capacitance of the fire protection material of 625000 J/m³K, and conductivity of 0.1 W/mK.

It should be noted that in the first 30 minutes, the behavior of the ratios for the specimen with fire protection thickness of 40 mm is sharply different and the values of the ratios are significantly higher than those obtained with the thinner model.

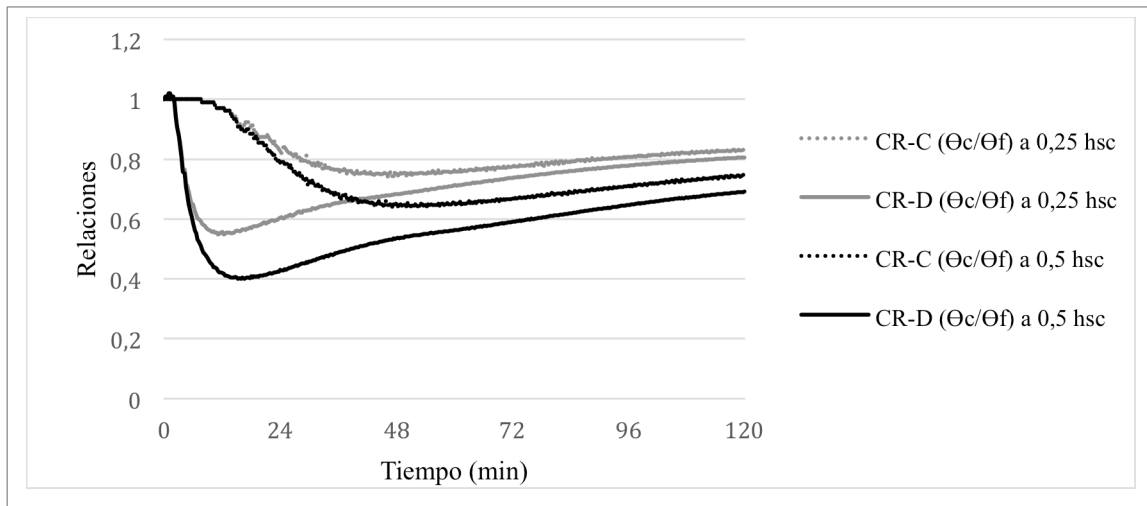


Figura 7. Influencia del espesor del material de revestimiento contra incendio en las relaciones de temperatura θ_c/θ_f a 0.25 h_{sc} y θ_c/θ_f a 0.5 h_{sc}
Figure 7. Influence of the thickness of the fire protection material on the temperature ratios θ_c/θ_f at 0.25 h_{sc} and θ_c/θ_f at 0.5 h_{sc} .

Considerando que los factores que tienen mayor influencia en las relaciones de temperatura son la altura del conector, el espesor del revestimiento y su conductividad, se modelaron especímenes con el valor medio de la capacitancia (625000 J/m³K) y conductividad del material de revestimiento igual a 0.1 W/mK (que conduce a mayores valores de las relaciones), así como diferentes espesores de revestimiento de ese material (10 mm, 25 mm y 40 mm), y alturas del conector de 50 mm, 60 mm, 75 mm, 90 mm, 100 mm y 125 mm, para determinar las relaciones de temperatura en los rangos de 0-30, 0-60, 0-90 y 0-120 minutos.

A los efectos de simplificar los resultados, adicionalmente se realizó un análisis de sensibilidad del impacto de los resultados en la resistencia de la conexión, lo que condujo a la propuesta final de relaciones de temperatura que se muestra en la Tabla 4, en la que se adoptan los valores mayores correspondientes al rango de 0-120 minutos, resultado que queda del lado seguro respecto a los casos con mayores conductividades del material de revestimiento y rangos de exposición al fuego menores.

Considering that the factors having most influence on temperature relationships are connector height, thickness of fire protection and its conductivity, modeling of specimens with the mean value of capacitance (625000 J/m³K) and conductivity of the fire protection material of 0.1 W/mK (which results in higher ratio values) was made, as well as different fire protection thickness of that material (10 mm, 25 mm and 40 mm), and connector heights of 50 mm, 60 mm, 75 mm, 90 mm, 100 mm and 125 mm, in order to determine the temperature relationships in the ranges of 0-30, 0-60, 0-90 and 0-120 minutes.

With the purpose of simplifying the results, a sensitivity analysis of the results' impact on the connection's resistance was additionally made, which led to the final proposal of temperature ratios shown in Table 4, where higher values corresponding to the range of 0-120 minutes were adopted, a result which remains on the safe side in relation to cases with higher conductivities of the fire protection material and lower fire exposure ranges.



Tabla 4. Relaciones de temperatura θ_{sc}/θ_f y θ_c/θ_f para vigas con revestimiento contra incendio
Table 4. Temperature ratios θ_{sc}/θ_f and θ_c/θ_f for beams with fire protection

Altura del conector/ Connector height (mm)	θ_{sc}/θ_f (%)	θ_c/θ_f a $0,25h_{sc}$ (%)		
		Espesor de 10/ Thickness of mm	Espesor de 25/ Thickness of mm	Espesor de 40/ Thickness of mm
50	85	80	85	90
60		80	85	90
75		75	80	85
90		75	80	85
100		70	75	85
125		70	75	80

Puede apreciarse que los porcentajes propuestos para determinar las temperaturas en el hormigón y el acero del conector para vigas con revestimiento contra incendio, son mayores que los propuestos en 3.3 para vigas sin revestimiento (ver Tabla 2). Esto se debe a que en las vigas con revestimiento contra incendio el calentamiento ocurre de forma más lenta por lo que las temperaturas del conector y el hormigón de la losa son más cercanas a la temperatura del ala del perfil.

Lo anterior se manifiesta en mayor medida en los porcentajes para determinar la temperatura en el hormigón, que son considerablemente mayores al 40 % adoptado por EN 1994-1-2 (2005) y a los porcentajes propuestos en el presente trabajo para vigas sin revestimiento. No obstante, debe tomarse en cuenta que el impacto de esos valores elevados en el diseño de la conexión se atenúa, debido a que se aplican como factor que multiplica a temperaturas promedios del ala del perfil notablemente inferiores, derivadas de la presencia del revestimiento.

It can be observed that the percentages proposed to determine the temperatures in the connector's steel and concrete for beams with fire protection are higher than those proposed in 3.3 for beams without fire protection (see Table 2). The reason for this is that heating occurs more slowly in the beams with fire protection, so that the temperatures of the connector and the slab concrete are closer to the steel flange temperature.

The above is especially clear in the percentages to determine the concrete temperature, which are considerably higher than the 40% adopted in EN 1994-1-2 (2005) and the percentages proposed in the present work for beams without fire protection. However, it should be taken into account that the impact of those high values on the design of the connection is mitigated, since they are applied as a multiplying factor at considerably lower average steel flange temperatures, derived from the presence of fire protection.

5. Impacto de los resultados anteriores en la determinación de la resistencia

5.1 Métodos de diseño para conexiones tipo perno en situación de incendio

En la normatividad internacional el único método de diseño disponible es el ofrecido en EN 1994-1-2 (2005), donde la resistencia de la conexión tipo perno en condiciones de incendio se define por el menor de los siguientes valores:

$$P_{fi,Rd} = 0,8 \cdot k_{u,\theta} \cdot P_{Rd} \quad (1a)$$

ó

or

$$P_{fi,Rd} = k_{c,\theta} \cdot P_{Rd} \quad (1b)$$

5. Impact of the above results on the determination of resistance

5.1 Design Methods for Stud Connections in Fire Situation

In the international standards, the only design method available is offered by EN 1994-1-2 (2005), where the stud connection resistance in fire situation is defined by the lowest of the following values:



Donde:

P_{Rd} = resistencia a temperatura ambiente y se obtiene de EN 1994-1-1 (2004).

$K_{c,\theta}$ = factor de reducción de la resistencia a compresión del hormigón a elevadas temperaturas, que es función de la temperatura en el hormigón (θ_c) determinada a partir de la temperatura del ala (θ_f), según las relaciones θ_c/θ_f , expresadas en porcentajes.

$K_{u,\theta}$ = factor de reducción de la resistencia del acero a elevadas temperaturas, que es función de la temperatura en el conector (θ_{sc}) determinada a partir de la temperatura del ala (θ_f), según las relaciones θ_{sc}/θ_f expresadas en porcentajes.

EN 1994-1-2 (2005) adopta como temperaturas del acero del conector y del hormigón de la losa, el 80% y el 40% de la temperatura del ala superior de la viga, respectivamente.

En la Figura 6 se muestran ejemplos que ilustran las diferencias en la predicción de la resistencia cuando se utilizan los porcentajes establecidos en EN 1994-1-2 (2005) y cuando se utilizan los porcentajes propuestos en el presente trabajo, tanto para vigas sin revestimiento contra incendio (Figura 8a) como para vigas con revestimiento (Figura 8b), para h_{sc} igual a 50 mm, diámetro del conector igual a 16 mm, f_c igual a 20 MPa y f_u igual a 415 MPa. En los ejemplos, la diferencia en la predicción de la resistencia de la conexión es significativa y llega a ser de un 15 %. Lo anterior es muestra de que en algunas situaciones de diseño dentro del alcance del código EN 1994-1-2 (2005) puede ser sobreestimada la resistencia de la conexión.

Where:

P_{Rd} = resistance at room temperature and it is obtained from EN 1994-1-1 (2004).

$K_{c,\theta}$ = reduction factor of the compressive strength of concrete at high temperatures, which is a function of the concrete temperature (θ_c) determined from the flange temperature (θ_f), according to the ratios θ_c/θ_f expressed in percentages.

$K_{u,\theta}$ = reduction factor of the steel resistance at high temperatures, which is a function of the connector temperature (θ_{sc}) determined from the flange temperature (θ_f), according to the ratios θ_{sc}/θ_f expressed in percentages.

EN 1994-1-2 (2005) adopts as temperatures of the connector's steel and the slab's concrete, 80% and 40% of the temperature of the upper flange of the beam, respectively.

Figure 6 illustrates the strength prediction differences when using the percentages indicated in EN 1994-1-2 (2005) and the percentages proposed in the present work, both for beams without fire protection (Figure 8a) and beams with fire protection (Figure 8b), for h_{sc} of 50 mm, connector diameter of 16 mm, f_c of 20 MPa and f_u of 415 MPa. In the examples, the prediction difference of the stud connection strength is significant and reaches 15%. This indicates that in some design situations within the scope of EN 1994-1-2 (2005) the resistance of the stud connection may be overestimated.

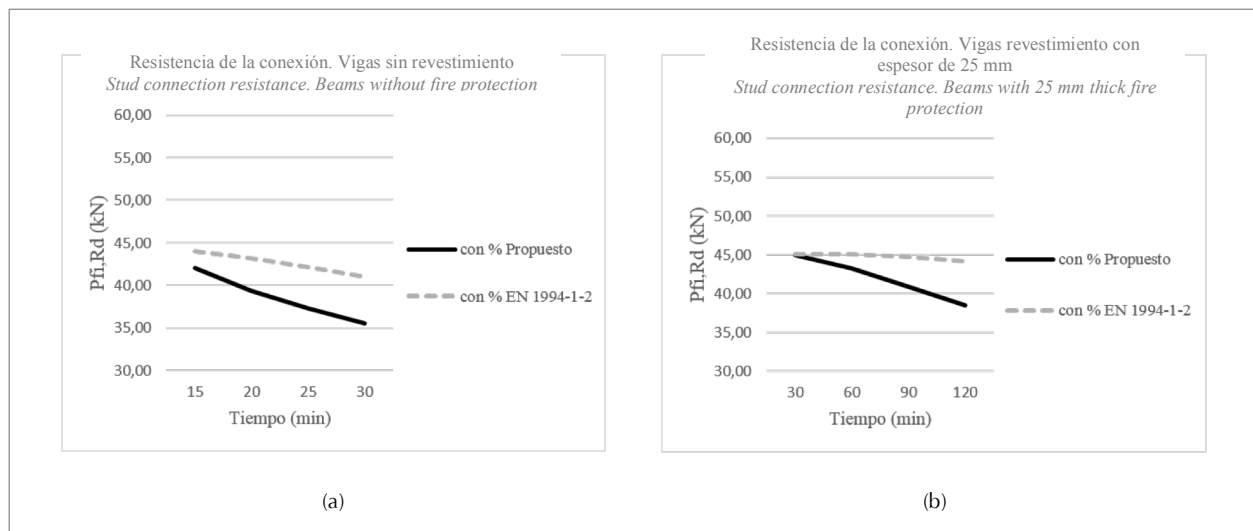


Figura 8. Predicción de la resistencia a elevadas temperaturas. (a) vigas sin revestimiento, (b) vigas revestidas con espesor de 25 mm

Figure 8. Prediction of the resistance of stud connections at high temperatures. a) Beams without fire protection, b) beams with 25 mm thick fire protection



6. Conclusiones

1. Con base al conjunto de resultados expuestos, para vigas sin revestimiento contra incendio se propone adoptar los valores asociados al rango 0-30 minutos y al nivel de determinación de la temperatura del hormigón a un cuarto de la altura del conector, diferenciando las alturas de conectores tomadas en cuenta, según se presenta en la Tabla 2.
2. En el caso de vigas con revestimiento contra incendio se aprecia un comportamiento térmico marcadamente diferente al caso antes comentado, lo que conduce a que los valores de las relaciones sean notablemente superiores a los de EN 1994-1-2 (2005) y a los propuestos en el presente trabajo para vigas sin revestimiento. Lo anterior conduce a la propuesta de valores de las relaciones, válidos en un rango amplio de propiedades térmicas del material del revestimiento contra incendio y dependientes de la altura del conector y el espesor del revestimiento, los cuales se presentan en la Tabla 4.
3. Finalmente, se demuestra que, tanto para vigas sin revestimiento contra incendio como para vigas con revestimiento, la utilización de las temperaturas del conector y el hormigón adoptadas por EN 1994-1-2 (2005) puede ser conducente a la sobrestimación de la resistencia de la conexión en situación de incendio, en algunas situaciones de diseño dentro del alcance del código.

6. Conclusion

1. Based on the results set forth, for beams without fire protection, it is suggested to adopt values associated to the 0-30 minute range and the determination level of the concrete temperature at one quarter of the connector height, differentiating the connector heights considered, as shown in Table 2.
2. As for the beams with fire protection, a strongly different thermal behavior is observed in relation to the case discussed above, which entails that the values of the ratios are visibly higher than those of EN 1994-1-2 (2005) and those proposed in the present work for beams without fire protection. This leads to the proposal of ratio values (presented in Table 4), which are valid in a wide range of thermal properties of the fire protection material and are dependent on the connector height and the thickness of the fire protection.
3. Finally, it has been demonstrated that for beams both with and without fire protection, the use of connector and concrete temperatures adopted by EN 1994-1-2 (2005) can lead to overestimate the resistance of the stud connection in fire situation, with regard to certain design situations within the scope of the code.

7. Referencias/References

- Anderberg Y. (2001)**, 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.
- Chen L., Li G. y Jiang S. (2012)**, Experimental studies on the behaviour of headed studs shear connectors at elevated temperatures. *Proceedings of the Seventh International Conference of Structures in Fire. Zurich, Switzerland* , 257-266.
- Correia A.M, Rodrigues J.P y Silva V.P. (2011)**, A simplified calculation method for temperature evaluation of steel columns embedded in walls. *Fire and Material J.*, Volumen 35, 431- 441.
- European Committee for Standardization (2005)**, Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures - part 1.2: General rules - structural fire design. EN 1994-1-2
- European Committee for Standardization (2004)**, Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings". EN 1994-1-1
- International Organization for Standardization (1999)**, Fire resistance tests – elements of building construction - part 1: general requirements. ISO 834-1. Geneva.
- Kruppa J. y B. Zhao (1995)**, Fire resistance of composite slabs with profiled steel sheet and composite steel concrete beams. Part 2: Composite Beams". ECSC Agreement n° 7210 SA 509.
- Lamont S., Usmani A. S. y D. D. Drysdale (2001)**, Heat transfer analysis of the composite slab in the Cardington frame fire tests. *Fire Safety Journal*. V. 36, 815-839.
- Larrua R. y V. P. Silva (2013a)**, Modelación térmica del ensayo de conexiones acero-hormigón a elevadas temperaturas. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. V. 36, 1 – 9.
- Larrua R. y V. P. Silva (2013b)**, Thermal analysis of push-out tests at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, V. 55, 1–14.
- Satoshi S. et al. (2008)**, Experimental study on shear strength of headed stud shear connectors at high temperature. *J. Struct. Constr. Eng. AIJ*, V. 73, 1417–1433.
- Schleich J.B. (2005)**, Properties of the materials. In: Implementation of Eurocodes. Handbook 5: Design of buildings for the fire situation. Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007. Luxembourg.
- Silva V. P. (2005)**, Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process – a simple derivation. *Eng. Struc.*, V. 27, 2036-2043.
- Wang Y. C. (1998)**, Composite Beams with Partial Fire Protection. *Fire Safety Journal*, V.30, 315-332.

