

Channel connections resistance at elevated temperatures

Yisel Larrúa-Pardo ^a, Rafael Larrúa-Quevedo ^b & Valdir Pignatta Silva ^c

^a Facultad de Construcciones, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba. yisel.larrua@reduc.edu.cu

^b Facultad de Construcciones, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba. rafael.larrua@reduc.edu.cu

^c Departamento de Estruturas e Geotécnica, EPUSP / Universidad de São Paulo USP, São Paulo, Brazil, valpigss@usp.br

Received: November 10th, 2014. Received in revised form: March 24th, 2015. Accepted: May 26th, 2015.

Abstract

In this paper the thermal analysis of the push out test of steel – concrete channel connections at elevated temperatures is carried out. The study takes into account numeric results generated by the program SuperTempcalc for two alternatives: protected and unprotected beams. Temperatures are proposed to be considered in determining the reduction factors of resistance and the impact of these results in determining the strength of the connection is evaluated. Finally, a simplified method for calculating the resistance of the connection is proposed, which considers defined temperatures in the concrete by the thermal analysis and is consistent with the formulations for calculating the resistance of channel connections at room temperature and with the current formulation for stud connections at elevated temperatures provided by international codes.

Key words: thermal analysis; channel connections; fire; resistance.

Resistencia de las conexiones tipo canal a elevadas temperaturas

Resumen

En el trabajo se realiza el análisis térmico del ensayo push-out de conexiones tipo canal en estructuras compuestas acero – concreto a elevadas temperaturas a partir de resultados numéricos generados por el programa SuperTempcalc. El estudio se realiza para dos alternativas: vigas sin revestimiento contra incendio y vigas revestidas. Se proponen las temperaturas a considerar en el concreto para determinar los factores de reducción de su resistencia y se valora el impacto de estos resultados en la determinación de la resistencia de la conexión. Finalmente, se propone un método simplificado para determinar la resistencia de la conexión, que considera temperaturas en el concreto definidas a través del análisis térmico y es coherente con las expresiones de cálculo de la resistencia de las conexiones tipo canal a temperatura ambiente y con la formulación para conexiones tipo perno a elevadas temperaturas vigente en la literatura internacional.

Palabras claves: análisis térmico; conexiones tipo canal; incendio; resistencia.

1. Introducción

En las estructuras compuestas de acero y concreto, la conexión constituye un componente esencial debido a que cumple la función de transmitir las fuerzas longitudinales del elemento de acero al de concreto y viceversa, y además resistir las fuerzas transversales que tienden a causar la separación entre los elementos.

De los conectores empleados en la práctica constructiva internacional, el conector tipo perno (*stud*) es el más difundido. Su uso presenta ventajas como fácil colocación y rapidez en la operación, pero la necesidad de tecnología especial limita su empleo. Por otra parte, el conector tipo

canal, se fabrica fácilmente a partir de perfiles o chapas de acero, y la unión con la viga se realiza mediante soldadura convencional.

Internacionalmente, se ha desarrollado 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, y en menor medida, en las conexiones tipo canal. Los programas experimentales de conexiones tipo canal se han desarrollado fundamentalmente en la región americana [1,2] y sus principales normativas incluyen formulaciones para el cálculo de su resistencia.

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 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 [3]. 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 4 Parte 1-2 (EN 1994-1-2) [4]. Recientemente se han realizado nuevos ensayos de conexiones tipo perno a elevadas temperaturas, entre los que sobresalen tres programas experimentales desarrollados en la región asiática [5-7].

Es importante resaltar que no se ha reportado ningún ensayo *push-out* a elevadas temperaturas de las conexiones tipo canal, ni se han propuesto formulaciones para la determinación de su resistencia en situación de incendio.

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.

Cabe señalar que la modelación numérica basada en el método de elementos finitos, es una eficaz herramienta ampliamente utilizada en la solución de problemas en múltiples ramas del saber y en particular en el ámbito de la ingeniería civil [8-10].

Un antecedente directo del presente trabajo lo constituye la investigación desarrollada por Larrúa y Silva [11,12] en la que se realizó la modelación térmica bidimensional de los especímenes *push-out* adoptados en el programa experimental del CTICM [3] y en los ensayos realizados por Satoshi *et al.*[5], ambos casos relacionados con conexiones tipo perno en vigas no protegidas. En el segundo caso fueron considerados especímenes con una sola losa de concreto, manteniendo, como Kruppa y Zhao [3], la carga constante para diferentes niveles de carga. A diferencia de la investigación en el CTICM [3] los especímenes se sometieron a una curva de fuego estándar modificada.

Los modelos desarrollados por Larrúa y Silva [11,12] guardan una alta correspondencia con los datos experimentales disponibles, y consideran acciones y propiedades térmicas normativas, lo que les confiere un grado de generalidad que permite la aplicación de los principios considerados y el aprovechamiento de los resultados alcanzados en la valoración de otras tipologías de conexiones y situaciones de diseño.

Lo anterior se pone de manifiesto en el presente artículo, donde se realiza el análisis térmico del ensayo *push-out* a elevadas temperaturas de las conexiones tipo canal, a partir de resultados numéricos generados por el programa *SuperTempcalc* y teniendo como referencia los criterios y resultados, antes mencionados, expuestos por Larrúa y Silva [11,12] relativos a la conexión tipo perno. El análisis se realiza para dos alternativas: vigas metálicas sin revestimiento contra incendio (SR), y vigas metálicas con revestimiento contra incendio (CR). Finalmente se propone

un método simplificado que permite obtener la resistencia de las conexiones tipo canal en vigas compuestas de acero y concreto con losa maciza en situación de incendio, que considera temperaturas en el concreto definidas a través del análisis térmico del ensayo *push-out* a elevadas temperaturas y es coherente con las expresiones de cálculo de la resistencia de las conexiones tipo canal a temperatura ambiente existentes en la literatura internacional y la formulación para conexiones tipo perno a elevadas temperaturas del EN 1994-1-2 [4].

2. Modelación térmica

La modelación numérica es una herramienta ampliamente utilizada hasta la fecha 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 [13-15]. 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 canal en losas macizas, utilizando el citado programa de cómputo. Tanto para la modelación de las acciones térmicas como de las propiedades térmicas de los materiales, se consideran como referencia importante las consideraciones del Eurocódigo 1 Parte 1-2 (EN 1991-1-2) [16] y EN 1994-1-2 [4].

2.1. Acciones térmicas

El desarrollo de las temperaturas es controlado por la combinación de la transferencia de calor por convección y por radiación. 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). La emisividad resultante es generalmente aproximada al producto de la emisividad del material (ϵ_m) y la emisividad del fuego (ϵ_f). En EN 1994-1-2 [4] y EN 1991-1-2 [16] ϵ_f es tomada usualmente como 1. EN 1994-1-2 [4] considera la emisividad del acero y el concreto 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 [17], con α_c igual a 25 W/m²K, y ϵ_r igual a 0,7, según lo definido en EN 1991-1-2 [16] para la propia curva de fuego estándar. En las partes no expuestas se considera la acción de la temperatura ambiente de 20°C con α_c igual a 9 W/m²K.

2.2. Propiedades térmicas de los materiales

La conductividad térmica y el calor específico del acero se han incluido como propiedades dependientes de la temperatura, de acuerdo con EN 1994-1-2 [4]. En el propio

código también se establece un valor de densidad independiente de la temperatura igual a 7850 kg/m^3 .

La conductividad térmica del concreto de peso normal, de acuerdo con EN 1994-1-2 [4], es también una propiedad dependiente de la temperatura y debe determinarse entre el límite superior y el límite inferior definidos en ese código [4,18,19]

Por otra parte, el calor específico del concreto de peso normal se consideró como una propiedad dependiente de la temperatura y la densidad de este material se tomó como un valor independiente de la temperatura en el intervalo entre $2300\text{-}2400 \text{ kg/m}^3$.

2.3. Modelación de la geometría

Como paso previo, fue verificado por medio de la modelación numérica realizada en un plano perpendicular a la sección transversal, que la influencia de las alas en las temperaturas de los puntos relevantes del espécimen es despreciable. Por tal razón, es factible modelar la geometría del conector canal, en el plano de la sección transversal, considerando solamente las dimensiones del alma, a modo de un conector tipo perno de gran diámetro. En consecuencia tiene sentido que, a falta de experimentación específica de conexiones tipo canal a elevadas temperaturas, se tome como referencia la calibración realizada para el caso de los modelos con conectores tipo perno [11,12].

Para la geometría del conector se tomaron en cuenta secciones con valores de alturas de 76,2 mm, 101,6 mm y 127 mm y valores de anchos de 50 mm, 100 mm y 150 mm que son representativos de la gama utilizada internacionalmente en la práctica constructiva y que a su vez están presentes en los ensayos de este tipo de conexión a temperatura ambiente [1,2,20]. Los espesores de protección adoptados fueron 10 mm, 25 mm y 40 mm, lo que se considera un rango razonable, según la práctica internacional. La Fig. 1 presenta ejemplos ilustrativos de las geometrías modeladas.

2.4. Modelación de las condiciones de frontera

La definición de las condiciones de frontera, tal como indica la Fig. 2, incluye el contorno 1 sobre el que se considera actuando el fuego estándar [17], mientras que el contorno 2 representa la región no expuesta, en la que actúa la temperatura ambiente (20°C) asociada a un coeficiente de convección de $9 \text{ W/m}^2\text{K}$.

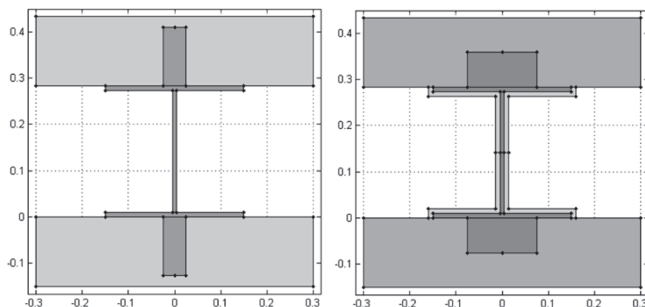


Figura 1. Modelación de la geometría. Ejemplos ilustrativos. a) 127 x 50 mm (SP), b) 76,2 x 150 mm (CP espesor = 10 mm).

Fuente: Los autores

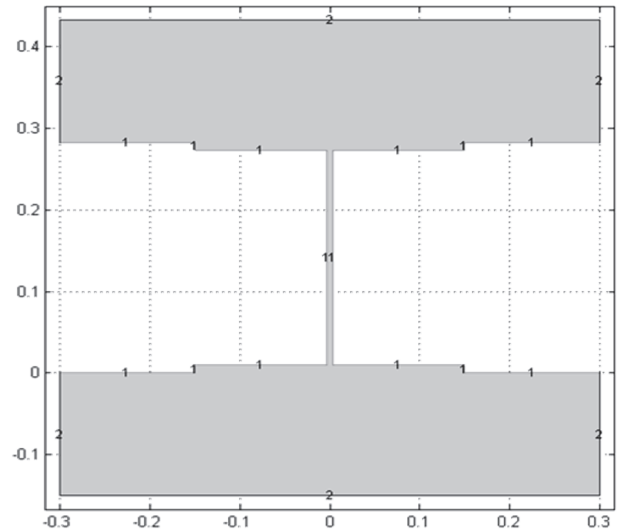


Figura 2. Condiciones de frontera.

Fuente: Los autores

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 en todos los casos, la malla se generó con elementos rectangulares de cuatro nodos. El tamaño del lado mayor de los elementos se definió como $l \leq 0.01 \text{ m}$

2.6. Obtención de los resultados

El programa de computación SuperTempcalc ofrece la posibilidad de obtener los resultados en diferentes formatos: gráficos, tablas de Microsoft Excel y/o animaciones. Dentro de los gráficos se encuentran las isotermas que permiten apreciar la distribución de las temperaturas en el dominio para un tiempo de exposición al fuego dado.

La Fig. 3 muestra las isotermas a 30 minutos de exposición a fuego de especímenes correspondientes a las dos alternativas consideradas, sin revestimiento contra incendio y con revestimiento (de 10 mm de espesor). Se pueden apreciar las diferencias marcadas en el comportamiento térmico de ambos casos.

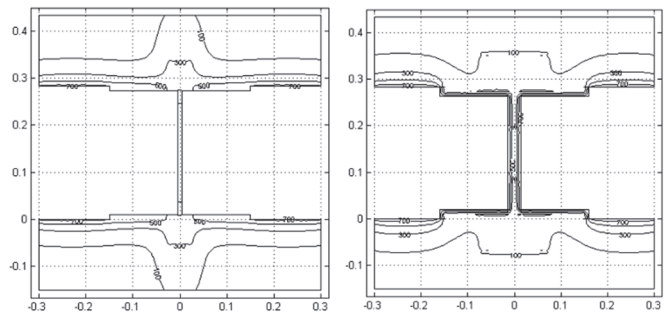


Figura 3. Isotermas a 30 minutos de exposición al fuego. a) Especimen sin revestimiento contra incendio. b) Especimen con revestimiento contra incendio con espesor de 10 mm.

Fuente: Los autores

Tabla 1.

Diseño estadístico del experimento numérico.

| Variables | Niveles | | |
|--------------------------|---------|-------|-----|
| Altura del conector (mm) | 76,2 | 101,6 | 127 |
| Ancho del conector (mm) | 50 | 100 | 150 |

Fuente: Los autores

3. Vigas sin revestimiento contra incendio

3.1. Diseño estadístico del experimento numérico

Se realiza el diseño de experimento con el objetivo de establecer la significación de las variables independientes consideradas en la respuesta térmica de los especímenes. En la Tabla 1 se muestran las variables estudiadas y sus respectivos niveles, según un diseño factorial 32, dos factores con tres niveles cada uno.

3.2. Determinación gráfica y numérica de la relación (θ_c/θ_f)

En la presente sección se determinan gráfica y numéricamente la relación entre la temperatura promedio del concreto (θ_c) y la temperatura promedio del ala (θ_f), en la conexión estudiada. Se consideró θ_f como el promedio de la temperatura medida en tres puntos del ala superior del perfil, θ_c se tomó como el promedio de las temperaturas en la región determinada por el borde del conector y el punto medio de la distancia entre el borde del ala y el conector, en dos niveles, a un cuarto de la altura del conector ($0,25 h_{sc}$) medido desde su base y a la mitad de la altura de conector ($0,5 h_{sc}$)

Aunque las mediciones experimentales para determinar la temperatura promedio en el concreto en los ensayos *push-out* en situación de incendio se realizaron a $0,5 h_{sc}$ [3] es razonable valorar el comportamiento de la relación θ_c/θ_f , cuando la temperatura promedio del concreto se determina a $0,25 h_{sc}$. Este nivel se seleccionó tomando en cuenta el mecanismo de fallo del conector tipo canal a temperatura ambiente, y la ocurrencia de altas temperaturas en la región situada en la cara inferior de la losa.

Las relaciones de temperatura se determinan para el intervalo de tiempo de exposición al fuego 0-30 minutos debido a que la resistencia de una viga compuesta sin protección contra incendio sometida a elevadas temperaturas no excede el entorno de los 30 minutos, y falla por otras razones ajenas al fallo específico de la conexión.

3.3. Evaluación de la significación de los factores

En esta sección se valora mediante un análisis de significación la influencia de la altura y ancho del conector en el comportamiento de las relaciones θ_c/θ_f a $0,25 h_{sc}$ y θ_c/θ_f a $0,5 h_{sc}$ para el intervalo de tiempo de exposición al fuego de 0-30 minutos.

Con los resultados de dichas matrices, derivadas del diseño experimental, se realizan análisis estadísticos con la ayuda del paquete informático *STATGRAPHICS v-15.1.02*. Se demuestra que las variables independientes, altura del conector (h_{sc}) y ancho del conector (b_{sc}), son significativas al 95 % de confianza en las variables dependientes.

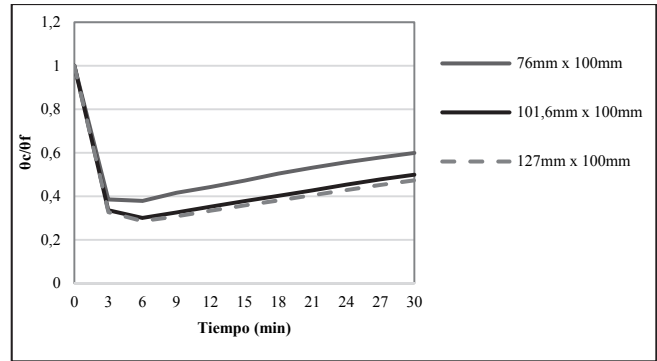


Figura 4. Comparación de la relación θ_c/θ_f variando la altura del conector cuando la temperatura promedio del concreto se determina a $0,25 h_{sc}$.

Fuente: Los autores

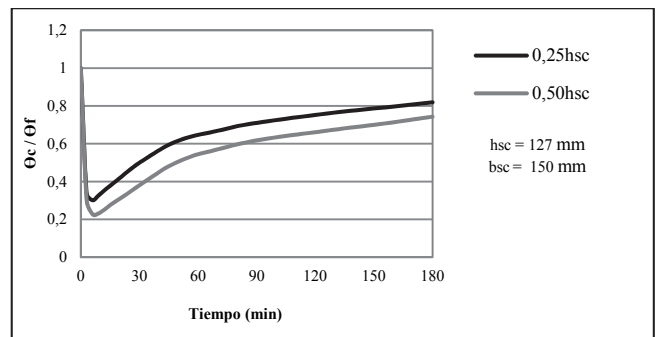


Figura 5. Comparación de la relación θ_c/θ_f determinada a $0,25 h_{sc}$ y a $0,5 h_{sc}$.

Fuente: Los autores

En la relación θ_c/θ_f la influencia del ancho depende del nivel en el que se determine la temperatura promedio del concreto. Cuando la temperatura del concreto se determina a $0,25 h_{sc}$ la influencia del ancho es muy pequeña pero cuando se determina a $0,5 h_{sc}$ y particularmente en combinación con la mayor altura, si tiene una influencia apreciable.

La altura del conector influye considerablemente en las relaciones de temperatura las cuales son notablemente mayores en los especímenes con menor altura de conector, lo cual se puede apreciar en la Fig. 4 que ilustra su influencia en la relación θ_c/θ_f a $0,25 h_{sc}$.

En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de como en un mismo espécimen, la relación θ_c/θ_f cuanto la temperatura del concreto se mide a $0,25 h_{sc}$ es notablemente mayor a cuando se mide a $0,5 h_{sc}$.

Si se utiliza la relación θ_c/θ_f a $0,25 h_{sc}$ para determinar la temperatura en el concreto los resultados serán mayores que si se utiliza la relación θ_c/θ_f a $0,5 h_{sc}$ lo cual concuerda con lo argumentado anteriormente (en la región cercana a la base del conector los valores de temperatura en el concreto son más elevados). Debido a esto se recomienda determinar la temperatura en el concreto a partir de porcentajes de temperatura determinados en el nivel $0,25 h_{sc}$, de esta manera se obtienen resultados más cercanos a la realidad.

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.

Tabla 2.

Relaciones de temperatura en vigas sin revestimiento contra incendio

| Altura del conector (mm) | θ_c/θ_f a $0,25h_{sc}$ (%) |
|--------------------------|--|
| 76,2 | 55 |
| 100 | 50 |
| 127 | 45 |

Fuente: Los autores

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

| Variables | Niveles | | |
|--|---------|-------|-----|
| Espesor del revestimiento contra incendio (mm) | 10 | 25 | 40 |
| Conductividad térmica del revestimiento (W/mK) | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| Altura del conector (mm) | 76,2 | 101,6 | 127 |
| Ancho del conector (mm) | 50 | 100 | 150 |

Fuente: Los autores

Se puede observar que los porcentajes para determinar la temperatura en el concreto varían en función de la altura del conector. Esto coincide con los resultados obtenidos por Larrúa y Silva [11], para conectores tipo perno.

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_c/θ_f en secciones compuestas con vigas con revestimiento contra incendio (CR). Se mantienen como factores de estudio la altura y el ancho del conector debido a que resultaron representativos para la sección compuesta con vigas sin revestimiento. Se consideran rangos de valores de conductividad y espesor de la protección, representativos de una amplia gama de materiales de revestimiento usualmente empleados en la práctica internacional. 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 81 combinaciones. Posteriormente, se realizó la optimización del diseño, utilizando los procedimientos incluidos en el citado programa, con lo que quedaron definidas 16 combinaciones. En la Tabla 3 se muestran las variables estudiadas y sus respectivos niveles.

4.2. Determinación gráfica y numérica de las relaciones θ_c/θ_f

Para la determinación de las relaciones de temperatura se siguió el mismo procedimiento descrito en epígrafe 2.2 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

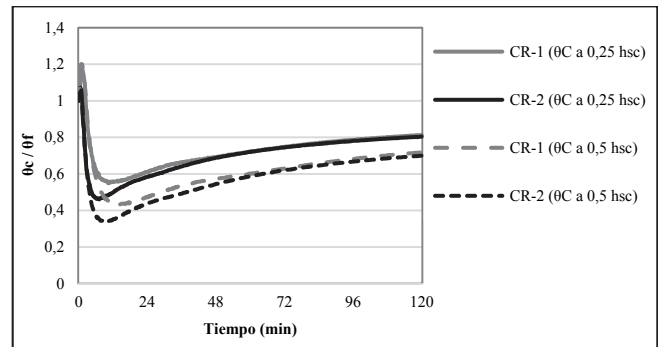
Se realizó el análisis de significación de las variables independientes para un 95 % de confianza. El factor con más

influencia en las relaciones de temperatura para todos los rangos de tiempo analizados es el espesor del revestimiento contra incendio. 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 segundo con más influencia para el rango de 0-120 minutos. Otro factor que influye en gran medida es la conductividad del material de revestimiento, que es el segundo factor con más influencia en los rangos de tiempo de 0-30 minutos, 0-60 minutos y 0-90 minutos. El ancho del conector también influye en las relaciones pero en menor medida.

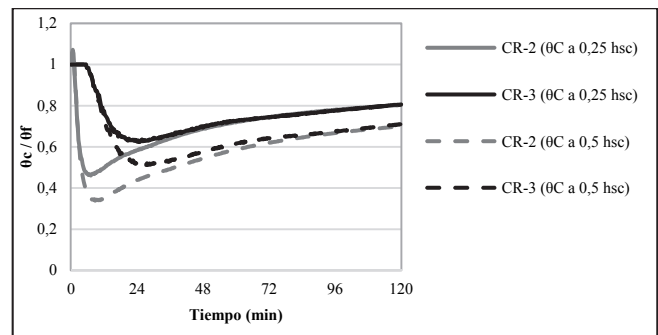
Para ilustrar la influencia de la conductividad del material de revestimiento contra incendio en las relaciones de temperatura, en la Fig. 6 se grafican las relaciones de temperatura θ_c/θ_f a $0,25h_{sc}$ y θ_c/θ_f a $0,5h_{sc}$ del espécimen CR-1 con conductividad igual a 0,1 W/mK y del espécimen CR-2 con conductividad igual a 0,3 W/mK, ambos con espesor del revestimiento contra incendio igual a 10 mm, altura del conector igual a 76,2 mm y ancho del conector igual a 50 mm.

Puede apreciarse claramente que la conductividad influye de forma significativa en las dos relaciones. Las relaciones de temperatura serán mayores a medida que disminuya la conductividad. La influencia de la conductividad disminuye a mayores tiempos de exposición al fuego.

En la Fig. 7 se puede apreciar mediante un ejemplo como influye significativamente el espesor del revestimiento contra incendio, en las relaciones de temperatura de dos especímenes, CR-2 y CR-3, con iguales conductividades y características geométricas de la conexión, pero con espesores de revestimiento diferentes, de 10 mm y 40 mm respectivamente.

Figura 6. Influencia de la conductividad del material de revestimiento contra incendio en las relaciones de temperatura θ_c/θ_f a $0,25h_{sc}$ y θ_c/θ_f a $0,5h_{sc}$.

Fuente: Los autores

Figura 7. Influencia del espesor del material de revestimiento contra incendio en las relaciones de temperatura θ_c/θ_f a $0,25h_{sc}$ y θ_c/θ_f a $0,5h_{sc}$.

Fuente: Los autores

Tabla 4.
Relaciones de temperatura para vigas con revestimiento contra incendio

| Altura del conector (mm) | θ_c/θ_f a $0,25h_{sc}$ (%) | | |
|--------------------------|--|------------------|------------------|
| | Espesor de 10 mm | Espesor de 25 mm | Espesor de 40 mm |
| 76,2 | 80 | 85 | 90 |
| 100,6 | 75 | 80 | 85 |
| 127 | 75 | 80 | 85 |

Fuente: Los autores

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.

Debido a que todos los factores estudiados influyen en las relaciones de temperatura se realizó un análisis de regresión y se obtuvieron expresiones que permiten predecir la magnitud de las mismas. Con estas expresiones se determinaron las relaciones de temperatura para los 81 especímenes del diseño original en los rangos de tiempo 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 a la conductividad del material de revestimiento igual a 0,1 W/mK (que conduce a mayores valores de las relaciones) y 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. Las relaciones definitivas son coherentes con los resultados propuestos por Larrúa y Silva [11].

Puede apreciarse que los porcentajes propuestos para determinar las temperaturas en el concreto, son mayores que los propuestos en el epígrafe 2.3 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 concreto de la losa son más cercanas a la temperatura del ala del perfil. 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.

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

En la normatividad internacional el único método de diseño para conexiones a elevadas temperaturas es el ofrecido en EN 1994-1-2 [4], que solo incluye la conexión tipo perno.

La resistencia de la conexión se define por el menor de los siguientes valores:

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

$$P_{fi,Rd} = k_{c,\theta} \cdot P_{Rd} \quad (2)$$

Donde:

P_{Rd} = resistencia a temperatura ambiente y se obtiene del Eurocódigo 4 Parte 1 (EN 1994-1-1 [21]).

$K_{c,\theta}$ = factor de reducción de la resistencia a compresión del concreto a elevadas temperaturas, que es función de la temperatura en el concreto (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 esta sección, se valora el impacto de los resultados presentados en los epígrafes 2.3 y 3.3 en la resistencia de las conexiones tipo canal a elevadas temperaturas.

Debido a que no existe una formulación para determinar la resistencia de las conexiones tipo canal a elevadas temperaturas, se toma como referencia el procedimiento de cálculo de las conexiones tipo perno a elevadas temperaturas de EN 1994-1-2 [4], considerando la expresión de predicción de la resistencia de las conexiones tipo canal a temperatura ambiente presente en AISC [22] por ser la más difundida internacionalmente y representar el formato más generalizado entre las formulaciones de diseño existentes para el caso. Dado que en la formulación considerada no se incluye la resistencia del acero del conector la expresión propuesta para el cálculo de la resistencia de la conexión tipo canal a elevadas temperaturas es la siguiente:

$$P_{fi,Rd} = k_{c,\theta} \cdot P_{Rd} \quad (3)$$

Donde:

$k_{c,\theta}$ es el factor de reducción de la resistencia a compresión del concreto a elevadas temperaturas, que es función de la temperatura en el concreto (θ_c) determinada a partir de la temperatura de ala (θ_f), según las relaciones θ_c/θ_f expresadas en porcentajes, según Tabla 2 para vigas sin revestimiento contra incendio y Tabla 4 para vigas revestidas.

P_{Rd} es la resistencia de la conexión tipo canal a temperatura ambiente (en kN), que está dada por la ecuación:

$$P_{Rd} = [0,3(t_f + 0,5t_w)L_c] \sqrt{f_c E_c} \quad (4)$$

Donde:

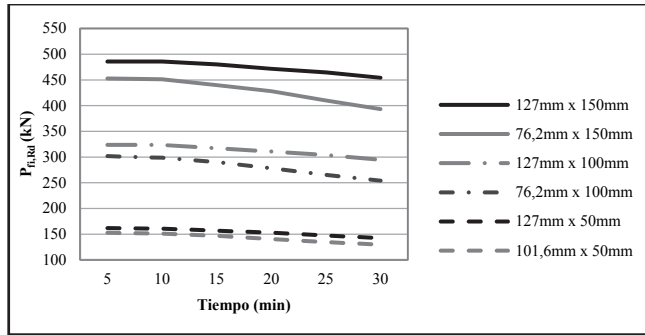
t_f : espesor del ala del conector (mm)

t_w : espesor del alma del conector (mm)

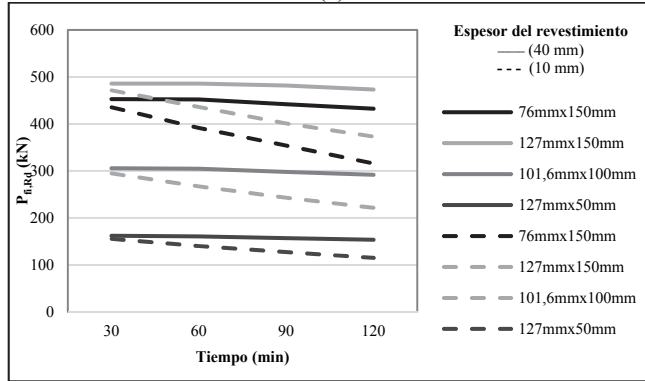
L_c : ancho del conector (mm)

f_c : resistencia a compresión del concreto (MPa)

En la Fig. 8 se grafican curvas de resistencia de la conexión a elevadas temperaturas en función del tiempo de exposición al fuego en las que se varía la altura y el ancho del conector para dos variantes: (a) vigas sin revestimiento contra incendio y (b) vigas revestidas, en las que también se varía el espesor de revestimiento.



(a)



(b)

Figura 8. Curvas de resistencia a elevadas temperaturas en función del tiempo de exposición al fuego. (a) Vigas sin revestimiento contra incendio. (b) Vigas con revestimiento contra incendio.

Fuente: Los autores

Se puede observar que en ambos gráficos, la resistencia de la conexión es más baja para los especímenes con menor ancho y altura de conector. En la Fig. 8 (b) se puede observar además, que la disminución de la resistencia en función del tiempo de exposición al fuego ocurre de forma menos marcada para los especímenes con espesor de 40 mm y es más acentuada para los que tienen espesores de 10 mm.

En la Fig. 9 se muestra como varía la resistencia para el conector canal de 76,2 mm de alto, 50 mm de ancho y espesor del revestimiento contra incendio de 25 mm, en función de la resistencia del concreto y la conductividad del material de revestimiento.

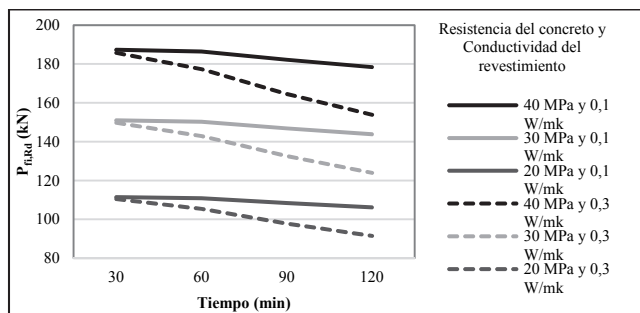


Figura 9. Comportamiento de la resistencia de la conexión a elevadas temperatura en función del tiempo de exposición al fuego para diferentes resistencias de concreto y conductividades del revestimiento contra incendio.

Fuente: Los autores

Se puede apreciar que la resistencia del concreto tiene gran influencia en la resistencia de la conexión a elevadas temperaturas, sin embargo, no influye en su decrecimiento en función del tiempo de exposición al fuego.

En cuanto a la conductividad del material de revestimiento contra incendio, la resistencia de la conexión tiene menor valor y disminuye de forma más acentuada cuando la conductividad tiene el valor máximo considerado de 0,3 W/mK.

6. Conclusiones

El comportamiento térmico de las dos alternativas consideradas, conexiones en vigas sin revestimiento contra incendio y en vigas con revestimiento, es marcadamente diferente, lo que conduce a que los valores de las relaciones θ_c/θ_f sean notablemente superiores en el segundo caso.

Con base al conjunto de resultados expuestos, se propone adoptar los valores asociados al nivel de determinación de la temperatura del concreto a un cuarto de la altura del conector, que resultan, en ambos casos, dependientes de la altura del conector como se muestra en las Tablas 2 y 4. En tanto, para vigas revestidas, las relaciones de temperatura propuestas dependen además del espesor del revestimiento contra incendio y son válidas para un rango amplio de propiedades térmicas de su material componente.

El método simplificado propuesto toma en cuenta los porcentos derivados del análisis térmico, que relacionan la temperatura en el concreto con la temperatura en el ala del perfil de acero, al tiempo que resulta coherente con las expresiones de cálculo existentes de la resistencia de las conexiones tipo canal a temperatura ambiente y la formulación para conexiones tipo perno a elevadas temperaturas del EN 1994-1-2 [4].

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a CAPES (Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior), a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) y a CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), por el apoyo brindado para el desarrollo de la investigación.

Referencias

- [1] Pashan, A., Behaviour of channel shear connectors: Push-out tests, MSc. Thesis, Department of Civil and Geological Engineering, University of Saskatchewan, Canada, 2006.
- [2] Ramírez, O., Larrúa, R., Vargas, R., Yeomans, F. y Pinto, M. Informe del proyecto SENACYT COL.06-007: Fundamentación experimental de sistemas estructurales y productos para el desarrollo competitivo de la construcción compuesta, 2010, 34 P.
- [3] 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 No 7210 SA 509, 1995, 63 P.
- [4] European Committee for Standardization. Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures. Part 1.2: General rules-Structural fire design. EN 1994-1-2, 2005.
- [5] Satoshi, S., Michikoshi, S., Kobayashi, Y. y Narihara, H., Experimental study on shear strength of headed stud shear connectors

- at high temperature. *J. Struct. Constr. Eng. AIJ*, 73 (630), pp. 1417-1433, 2008. DOI: 10.3130/aijs.73.1417
- [6] Choi, S.-K., Han, S.-H., Kim, S.-B., Nadjai, A., Faris, A. and Choi, J.-Y., Performance of shear studs in fire. Application of structural fire engineering. Proceedings of International Conference, Prague, pp. 490-495, 2009.
- [7] Chen, L., Li, G. and 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. Zurich, Switzerland, pp. 257-266, 2012.
- [8] Starossek, U., Falah, N. and Löhning, T., Numerical analyses of the force transfer in concrete-filled steel tube columns, *Structural Engineering and Mechanics*, 35 (2), pp. 241-256, 2010. DOI: 10.12989/sem.2010.35.2.241
- [9] Lam, D. and Ellobody, E., Behavior of headed stud shear connectors in composite beam, *Journal of Structural Engineering*, 131 (1), pp. 96-106, 2005. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:1(96)
- [10] Rodríguez, W. and Pallares, M.R. Three-dimensional modeling of pavement with dual load using finite element. *DYNA*, 82 (189), pp. 30-38, 2015. DOI: 10.15446/dyna.v82n189.41872.
- [11] Larrua, R. and Silva, V.P., Thermal analysis of push-out tests at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 55, pp. 1-14, 2013. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.08.009
- [12] Larrua, R. y Silva, V.P., Modelación térmica del ensayo de conexiones acero-concreto a elevadas temperaturas. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 36, pp. 1-9, 2013.
- [13] 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.
- [14] Silva, V.P., Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process—a simple derivation. *Engineering Structures*, 27, pp. 2036-2043, 2005. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.05.018
- [15] 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 Journal*, 35, pp. 431- 441, 2011. DOI: 10.1002/fam.1063
- [16] European Committee for Standardization. Eurocode 1. Actions on structures, Part 1-2: General actions - actions on structures exposed to fire. EN 1991-1-2. 2002.
- [17] International Organization for Standardization. Fire-Resistance Tests. Elements of Building Construction, Part 1.1: General Requirements for Fire Resistance Testing. Geneva. ISO 834.1990. (Revision of first edition ISO 834:1975).
- [18] 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.
- [19] Schleich, J.B. Properties of the materials. In: Implementation of Eurocodes. Design of buildings for the fire situation. Handbook 5. KI CTU/CKAIT/RWTH/IET/UOP/TNO/IMK/BRE. Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007, Luxembourg, 1-28, 2005.
- [20] Maleki, S., Bagheri, S. Behavior of channel shear connectors, Part I: experimental study. *Journal of Constructional Steel Research*, 64, pp. 1333-1340, 2008. DOI: 10.1016/J.JCSR.2008.01.006. DOI: 10.1016/J.JCSR.2008.01.010
- [21] European committee for standardization. Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1994-1-1. 2004.
- [22] American Institution of Steel Construction, AISC: Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, 2010.

Y. Larrúa-Pardo, se graduó de Ing. Civil en el año 2004 y de MSc. en Conservación de Centros Históricos y Rehabilitación del Patrimonio Edificado en el año 2008. Actualmente es profesora asistente de la Facultad de Construcciones e investigadora del Centro de Estudio CECODEC de la Universidad de Camagüey, Cuba. Su línea de investigación actual es acerca del comportamiento y diseño de estructuras compuestas en situación de incendio.

R. Larrúa-Quevedo, se graduó de Ing. Civil en el año 1980 y de Dr. en Ciencias Técnicas en el año 1992. Realizó estudios de Pos-doctorado en la Universidad Politécnica de Cataluña, España y en la Universidad de São Paulo, Brasil. Actualmente es profesor titular de la Universidad de Camagüey, Cuba y líder del Grupo de Estructuras del Centro de Estudio CECODEC de la Universidad de Camagüey, Cuba. Investiga en el área de ingeniería de estructuras, con énfasis en las estructuras compuestas y en el diseño estructural en situación de incendio.

V.P. Silva, concluyó el Dr. en Ing. Civil - Estructuras en 1997, en la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo (USP), Brasil. Realizó estudios de Pos-doctorado en la Universidad de Coimbra. Es Profesor Doctor de la Poli-USP. Revisor de 19 revistas científicas. Investiga en el área de Ingeniería de Estructuras, con énfasis en la ingeniería estructural en situación de incendio. Es líder del Grupo de Investigaciones en seguridad estructural contra incendio de la USP. Es Vicepresidente de ALBRASCI y miembro de la IAFSS, IBRACON, ABECE e GSI/USP.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas
de Transporte
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisaciv_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5172