

Diseño de conexiones mecánicas tipo canal en vigas compuestas bajo fuego

Design of channel mechanical connections in composite beams in fire

Yisel Larrua-Pardo^I, Rafael Larrua-Quevedo^I, Valdir Pignatta Silva^{II}

I. Universidad de Camagüey. Facultad de Construcciones. Camagüey. Cuba.

Correo electrónico: yisel.larrua@reduc.edu.cu

II. Universidad de São Paulo, Departamento de Estructuras e Geotécnica. São Paulo. Brasil

Recibido: 13 de octubre de 2014

Aceptado: 21 de diciembre de 2014

Resumen

En este trabajo se propusieron dos métodos, uno simplificado y otro gráfico alternativo para el diseño de la conexión mecánica tipo canal en vigas compuestas de hormigón y acero en situación de incendio, a partir del estudio de su comportamiento. Se utilizó como herramienta la modelación numérica. El método simplificado desarrollado considera temperaturas definidas a través de la modelación térmica del ensayo *push-out* en situación de incendio y es coherente con las expresiones de diseño de las conexiones mecánicas tipo canal a temperatura ambiente y la formulación existente para el diseño de las conexiones tipo perno a elevadas temperaturas. El método gráfico alternativo propuesto constituye una opción que permite obtener de una forma directa y rápida, la resistencia a elevadas temperaturas de la conexión mecánica tipo canal para un tiempo de resistencia al fuego, en función de su resistencia a temperatura ambiente.

Palabras claves: conexión mecánica tipo canal, método simplificado, método gráfico alternativo, modelación numérica, incendio.

Abstract

In this paper two methods to design of channel mechanical connection are proposed, a simplified one and graphical alternative another, both using the numerical analysis for the study of the mechanical connection behavior. The developed simplified method considers temperatures defined through the thermal modelling of the push-out test in fire and it is coherent with the design expressions of the channel mechanical connections to ambient temperature, and the current formulation for the design of the stud connections at elevated temperatures. The proposed alternative graphical method constitutes an option that allows obtaining, in a direct and quick way, the resistance to elevated temperatures of the channel mechanical connections for a determined time of resistance to the fire, according to its resistance to ambient temperature.

Key words: channel mechanical connection, simplified method, alternative graphical method, numerical model, fire.

Introducción

Una viga compuesta de acero y hormigón, está integrada por una sección de acero y una losa de hormigón armado unidas por medio de conectores mecánicos de cortante que al ser soldados al ala superior de la viga de acero y quedar embebidos en el hormigón se oponen al deslizamiento relativo entre ambas superficies. El conector mecánico más difundido internacionalmente en la actualidad es el tipo perno. No obstante, el conector mecánico tipo canal, que se fabrica fácilmente a partir de perfiles o chapas de acero, se utiliza ampliamente en el entorno americano.

El estudio de las conexiones mecánicas a temperatura ambiente y en situación de incendio es fundamental debido a que son las encargadas de transmitir las fuerzas longitudinales y de resistir las fuerzas transversales en una sección compuesta. En situación de incendio, en los materiales estructurales componentes, se producen pérdidas de las características físicas y químicas al ser expuestos a altas temperaturas; estas causan reducciones de la resistencia y la rigidez, lo que debe ser tomado en cuenta al realizar su diseño estructural. Además, entender y predecir su comportamiento es complicado dado a que cuando una viga compuesta se somete a elevadas temperaturas tanto el perfil de acero como la losa de hormigón se exponen directamente al fuego, pero los conectores de cortante se calientan de forma indirecta por el calor transferido por el ala del perfil.

A nivel internacional, se han realizado numerosos estudios experimentales o numéricos para evaluar la resistencia y el comportamiento carga-deslizamiento de las conexiones mecánicas a temperatura ambiente, principalmente relacionados con la conexión mecánica tipo perno [1-4] y en menor medida con las conexiones tipo canal u otros tipos de conexiones [5-7].

Sin embargo, las investigaciones experimentales de conexiones a elevadas temperaturas es un campo menos explorado, lo que está motivado por la necesidad de instalaciones y equipamiento especial, que conduce a un elevado costo del experimento. Los primeros ensayos de conexiones mecánicas a elevadas temperaturas se realizaron en el *Centre Technique Industriel de la Construction Métallique*, CTICM en el año 1992. Para este propósito se diseñó un dispositivo especial y original por Kruppa y Zhao [8]. Los especímenes guardan correspondencia con la probeta estándar para temperatura ambiente para conexiones tipo perno [9] y fueron sometidas a la acción del fuego estándar ISO 834 -1 [10], para diferentes niveles de carga constante, en secciones de acero sin revestimiento térmico y considerando pernos de 100 mm de altura y diámetros de 16, 19 y 22 mm.

Los resultados de este programa experimental fueron tomados en cuenta para proponer el método simplificado incluido en la actual normativa europea en situación de incendio [11], donde se calcula la resistencia a temperatura ambiente de la conexión tipo perno y se afecta por los coeficientes de reducción de la resistencia de los materiales en función de su temperatura. La principal simplificación incluida en el método consiste en la consideración de las temperaturas del acero del conector y del hormigón de la losa como el 80 % y el 40 % de la temperatura del ala de la viga de acero, respectivamente, en lugar de utilizar temperaturas variables en la altura de la sección transversal. Adicionalmente, en investigaciones precedentes [12, 13] se demostró que estos porcentajes no son válidos para todas las situaciones de diseño con pernos dentro del alcance del código y se determinaron nuevos porcentajes que consideran temperaturas definidas a través de la modelación térmica del ensayo *push-out*. Todo lo anterior hace que el alcance del método sea limitado y no tenga validez para otros tipos de conexiones diferentes al perno.

Recientemente se han realizado nuevos ensayos de conexiones mecánicas a elevadas temperaturas, entre los que sobresalen varios programas experimentales relacionados con la conexión tipo perno desarrollados en la región asiática [14-17] y las investigaciones relacionadas con otras tipologías de conexiones en la Universidad de Coímbra, Portugal [18-19]. No obstante, puede afirmarse que ninguno de los programas experimentales realizados hasta la fecha resuelve las limitaciones del método ni incluyen el estudio del comportamiento del conector mecánico tipo canal a elevadas temperaturas, a lo que se añade que no existen formulaciones para su diseño en tal situación.

En este trabajo se proponen dos métodos de diseño, uno simplificado y el otro gráfico alternativo, válidos para conexiones mecánicas tipo canal en vigas compuestas de acero y hormigón con losa maciza, coherentes con las expresiones de diseño de estas conexiones a temperatura ambiente y la formulación existente para el diseño de las conexiones tipo perno a elevadas temperaturas [11]. Se utilizó la modelación numérica del ensayo *push-out* como herramienta para fundamentar relaciones que permiten obtener las temperaturas en el conector y en el hormigón, a partir de la temperatura del ala de la sección de acero, para un conjunto de situaciones de diseño representativas de la práctica constructiva internacional y con validez tanto para vigas sin revestimiento contra incendio como para vigas revestidas.

Métodos y Materiales

Se adopta como método la modelación numérica con base en el método de elementos finitos, auxiliada por el software *SuperTempcalc* (*Temperature Calculation and Design v.5*), que pertenece a la familia de las aplicaciones de modelación bidimensional y es reconocido por su eficacia en la solución de problemas de transferencia de calor en ingeniería estructural. Se toma en cuenta la probeta estándar reglamentada en [9] para conexiones tipo perno. (Ver fig. 1)

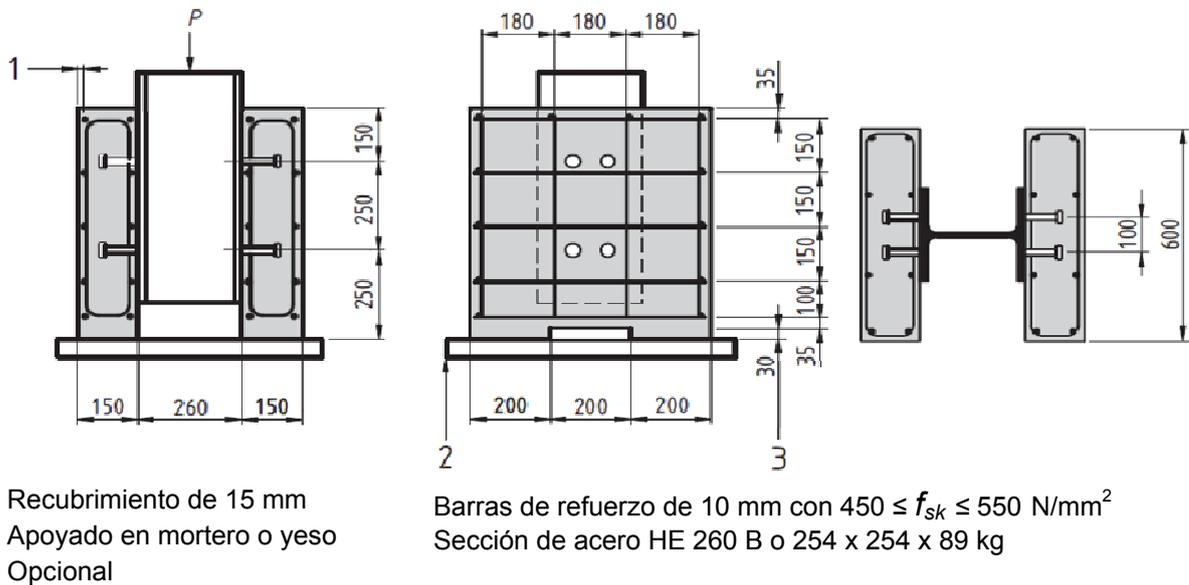


Fig. 1. Probeta estándar para el ensayo *push-out*

Para la modelación de la geometría se considera un dominio coincidente con la sección transversal del espécimen [11]. La modelación de la geometría del conector mecánico tipo canal, se realizó en el plano de la sección transversal que pasa por el alma de la canal, a modo de un conector tipo perno de gran diámetro por lo que se tomó como referencia la calibración contra resultados experimentales realizada previamente para los modelos de conectores tipo perno en las que se logra una alta correspondencia entre los resultados numéricos y experimentales. [12, 13].

Se consideraron conectores tipo canal que resultan de combinar alturas de 76,2 mm, 101,6 mm y 127 mm, con anchos de 50 mm, 100 mm y 150 mm, para un total de 9 combinaciones, lo que es representativo de la gama utilizada internacionalmente en la práctica constructiva en correspondencia con las dimensiones habituales de las secciones compuestas, y a su vez es coherente con los programas experimentales de este tipo de conexión a temperatura ambiente [5, 6]. Se incluye cuando procede, el material de revestimiento contra incendio.

En la figura 2 se muestran dos ejemplos ilustrativos de los modelos realizados.

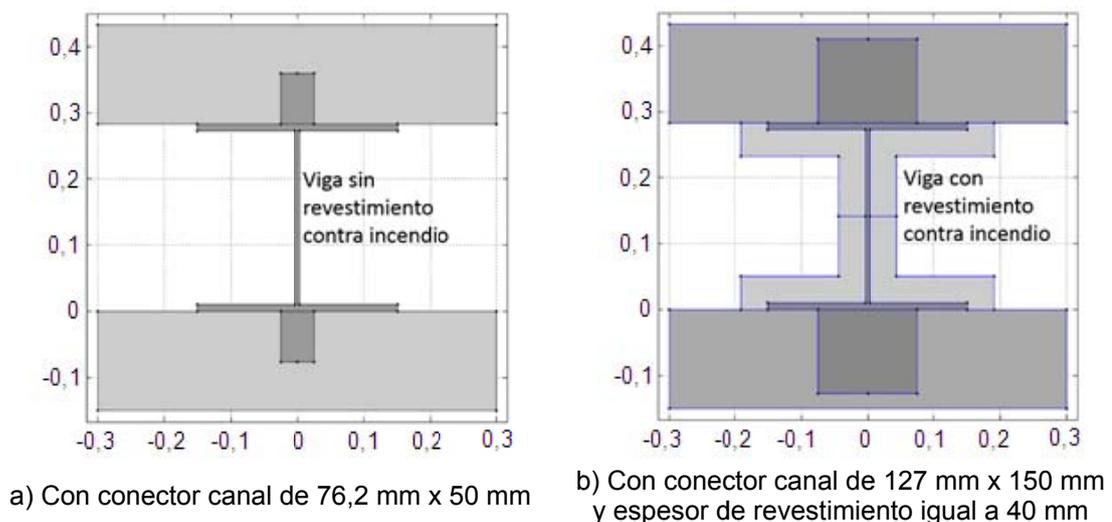


Fig. 2. Modelación de la geometría

Dado que el enfoque de modelación bidimensional adoptado no permite la inclusión de las alas del conector canal se realizó un estudio previo por medio de modelos bidimensionales en un plano perpendicular a la sección transversal, considerando las secciones canales antes mencionadas. Se demostró que la influencia de las alas en la evolución de las temperaturas no es significativa con un 95 % de confianza.

En la modelación de los materiales la conductividad térmica y el calor específico del acero se incluyen como propiedades dependientes de la temperatura, de acuerdo con [11]. 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 hormigón de peso normal, de acuerdo con [11], es también una propiedad dependiente de la temperatura y debe determinarse entre el límite superior y el límite inferior definidos en ese código. Por otra parte, el calor específico del hormigón 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 $2300\text{-}2400 \text{ kg/m}^3$.

Para el material de revestimiento contra incendio se asumen una capacitancia media igual a $625000 \text{ J/m}^3\text{K}$ y un rango de conductividad térmica de $0,1$ a $0,3 \text{ W/Mk}$, lo que no se corresponde con un material específico sino con propiedades representativas de morteros y fibras proyectados comercializados a nivel internacional para la protección tipo contorno de vigas de acero. Los morteros proyectados están compuestos de materiales como yeso y cemento, resinas acrílicas, vermiculita expandida, polietileno expandido o celulosa. Las fibras proyectadas están compuestas por fibras minerales y aglomerante. Estos materiales son incombustibles, no producen humo y no contribuyen a la corrosión del acero. Los espesores de revestimiento modelados de 10 mm , 25 mm y 40 mm se corresponden con los utilizados para estos tipos de materiales.

Para la modelación de las acciones térmicas se asumen las recomendaciones de [8, 19] las cuales son resumidas a continuación:

- Las condiciones de contorno reflejan un escenario real de incendio donde la viga compuesta está bajo un fuego producido en el piso inferior, por lo que quedan expuestas directamente al calor las superficies laterales e inferior de la viga de acero y la cara inferior de la losa [10].
- El flujo neto de calor se considera como la suma del flujo neto por convección, controlado por el coeficiente de convección, y el flujo neto por radiación, controlado por la emisividad del material resultante y la del fuego. En [8, 19] ε_f es tomada usualmente como 1. En [8] se consideran la emisividad del acero y el hormigón relacionadas con las superficies de los elementos 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 [7], con α_c igual a $25 \text{ W/m}^2\text{K}$, y ε_f igual a $0,7$, según lo definido en [20] para la propia curva de fuego estándar que está dada por la expresión:

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (1)$$

Donde:

θ_g : temperatura del gas en el compartimento de fuego ($^{\circ}\text{C}$)

t: tiempo (min)

En las partes no expuestas se considera la acción de la temperatura ambiente de $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ con α_c igual a $9 \text{ W/m}^2\text{K}$.

En cuanto al método de diseño, se parte de considerar el enfoque del único método disponible para el diseño de conexiones mecánicas acero - hormigón en situación de incendio [11], que es válido para la conexión tipo perno cuya resistencia ($P_{fi,Rd}$) es igual al menor de los siguientes valores:

$$P_{fi,Rd} = 0,8 \cdot k_{u,\theta} \cdot P_{Rd} \quad (2)$$

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

Donde:

P_{Rd} es la resistencia a temperatura ambiente y se obtiene de [9].

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

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

La norma citada en [11] propone que las temperaturas del acero del conector y del hormigón de la losa pueden tomarse como el 80 % y el 40 % de la temperatura del ala superior de la viga, respectivamente

Resultados y Discusión

Como parte de los resultados del trabajo se propone un método simplificado para el diseño de las conexiones mecánicas tipo canal en situación de incendio que toma como referencia el procedimiento de cálculo de las conexiones tipo perno a elevadas temperaturas de [11]. Para la concepción del método se parte de la expresión de predicción de la resistencia de las conexiones tipo canal a temperatura ambiente presente en AISC [21] por ser la más difundida y utilizada internacionalmente. A su vez, es representativa de la tendencia de determinar la resistencia de la conexión tomando en cuenta los datos geométricos de conector de acero y la resistencia del hormigón. Vale comentar que en los códigos europeos [9, 11] no se incluyen formulaciones para el caso de estudio. Por tanto la expresión propuesta para el cálculo de la resistencia de la conexión tipo canal a elevadas temperaturas ($P_{fi,Rd,c}$) es la siguiente:

$$P_{fi,Rd,c} = k_{c,\theta} \cdot P_{Rd,c} \quad (4)$$

Donde:

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

$$P_{Rd,c} = [0,3(t_f + 0,5t_w)L_a] \sqrt{f'_c E_c} \quad (5)$$

Donde:

t_f espesor del ala del conector (mm)

t_w espesor del alma del conector (mm)

L_a ancho del conector (mm)

f'_c resistencia a compresión del hormigón (MPa)

E_c módulo de elasticidad del hormigón (MPa)

Dado el formato seleccionado para la formulación es esencial la determinación de las relaciones de temperatura θ_c/θ_f que se corresponden con las situaciones de diseño descritas anteriormente para lo que se modeló el ensayo *push-out* para dos alternativas, vigas sin revestimiento contra incendio (SR) y vigas con revestimiento (CR). Los parámetros evaluados para conexiones en vigas compuestas sin revestimiento contra incendio fueron la altura y el ancho del conector mecánico. En vigas con revestimiento contra incendio los parámetros evaluados fueron la altura y ancho del conector y la conductividad y espesor del material de revestimiento. En ambos casos se evaluó la influencia del nivel en que se determina la temperatura en el hormigón considerando dos niveles, la mitad de la altura del conector $0,5 h_{sc}$ y a un cuarto de la altura del conector $0,25 h_{sc}$.

La selección de estos niveles se debe a que las mediciones experimentales para determinar la temperatura promedio en el hormigón en los ensayos *push-out* en situación de incendio de la conexión mecánica tipo perno se realizaron a $0,5 h_{sc}$ [8] y además, es razonable valorar el comportamiento de la relación θ_c/θ_f , cuando la temperatura promedio del hormigón se determina a $0,25 h_{sc}$ tomando en cuenta el mecanismo de fallo del conector mecánico tipo canal a temperatura ambiente y la ocurrencia de altas temperaturas en la región situada en la cara inferior de la losa.

El análisis paramétrico demostró que tanto para vigas sin revestimiento contra incendio como para vigas revestidas la altura del conector (h_{sc}) tiene gran influencia en la relación de temperatura θ_c/θ_f . Sin embargo, el comportamiento térmico de las dos alternativas consideradas es marcadamente diferente, lo que conduce a que los valores de las relaciones θ_c/θ_f sean notablemente superiores en el segundo caso. 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 hormigón de la losa son más cercanas a la temperatura del ala del perfil.

La influencia del ancho del conector mecánico dependió del nivel en el que se determinó la temperatura promedio del hormigón. Cuando la temperatura del hormigón se determina a $0,25 h_{sc}$ la influencia del ancho no es significativa pero cuando se determina a $0,5 h_{sc}$ y particularmente en combinación con la mayor altura, si tiene una influencia apreciable. En vigas con revestimiento contra incendio el factor con más influencia en las relaciones de temperatura para todos los rangos de tiempo analizados fue el espesor del revestimiento.

De igual manera se pudo comprobar que tanto para las vigas con revestimiento contra incendio como para las vigas no revestidas, si se utiliza la relación θ_c/θ_f a $0,25 h_{sc}$ para determinar la temperatura en el hormigón los resultados son 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 hormigón son más elevados).

A partir del conjunto de resultados expuestos, se propone adoptar los valores de relaciones θ_c/θ_f asociados al nivel de determinación de la temperatura del hormigón a un cuarto de la altura del conector, que resultan, en ambos casos, dependientes de la altura del conector y para vigas revestidas, las relaciones de temperatura propuestas dependen además del espesor del revestimiento contra incendio y se adoptan los valores mayores correspondientes a la conductividad del material de revestimiento igual a $0,1 \text{ W/mK}$, resultado que queda del lado seguro respecto a los casos con mayores conductividades del material como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Relaciones de temperatura en vigas sin revestimiento contra incendio con conexión tipo canal

Altura del conector (mm)	Vigas sin revestimiento contra incendio θ_c/θ_f (%)	Vigas con revestimiento contra incendio θ_c/θ_f (%)		
		Espesor de 10 mm	Espesor de 25 mm	Espesor de 40 mm
76,2	55	80	85	90
100,0	50	75	80	85
127,0	45	75	80	85

Las relaciones de temperatura θ_c/θ_f propuestas para determinar la temperatura en la conexión mecánica tipo canal son coherentes con los resultados obtenidos en las investigaciones anteriormente mencionadas [12, 13] referentes a la conexión mecánica tipo perno.

Tomando en cuenta que es una tendencia de las normas internacionales en el ámbito ofrecer alternativas gráficas o tabulares a los métodos analíticos o computacionales, se concibe el desarrollo de un método gráfico alternativo que facilite el diseño de la conexión en estudio. A tal efecto se realizaron dos diseños de experimentos, uno para vigas sin revestimiento contra incendio y otro para vigas revestidas por medio del programa *Statgraphics XV Centurion*. Se adoptó un diseño factorial multinivel que arrojó un total de 27 combinaciones para vigas sin revestimiento y 162 combinaciones para vigas revestidas. El amplio rango evaluado permite cubrir numerosas situaciones de diseño que pudieran presentarse en la práctica constructiva.

Para vigas sin revestimiento los factores evaluados fueron la altura del conector (h_{sc}), el ancho del conector (b_{sc}) y la resistencia a compresión del hormigón (f'_c). Para vigas con revestimiento se incluyeron además la conductividad y el espesor del material de revestimiento contra incendio. Los parámetros considerados para el revestimiento contra incendio aseguran la implementación del método gráfico para una amplia gama de materiales utilizados a nivel internacional.

En la tabla 2 se muestran las variables y los niveles evaluados para la implementación del método gráfico alternativo.

Tabla 2. Variables y niveles evaluados en los diseños experimentales

Variables	Niveles		
Vigas sin revestimiento contra incendio			
Ancho del conector (mm)	50	100	150
Altura del conector (mm)	76,2	101,6	127
Resistencia a compresión del hormigón (MPa)	20	30	40
Vigas con revestimiento contra incendio			
Ancho del conector (mm)	50	100	150
Altura del conector (mm)	76,2	101,6	127
Resistencia del hormigón (MPa)	20	30	40
Espesor del material de revestimiento (mm)	10	25	40
Conductividad del material de revestimiento (W/mK)	0,1		0,3

Después de definir las características de los diseños de experimento se procedió al cálculo de la resistencia de la conexión mecánica tipo canal a temperatura ambiente ($P_{Rd,c}$) y de su resistencia a elevadas temperaturas ($P_{fi,Rd,c}$) para el rango de exposición al fuego de 5 a 40 minutos en vigas sin revestimiento contra incendio y para el rango de 30 a 120 minutos en vigas revestidas, en correspondencia con los tiempos máximos de resistencia al fuego que es posible alcanzar con cada una de estas tipologías, utilizando el método simplificado propuesto en el presente trabajo. Para determinar la resistencia en situación de incendio se introducen valores de temperatura en el ala del perfil determinadas mediante la modelación numérica del ensayo *push-out*.

A continuación se construyeron curvas de las relaciones $P_{fi,Rd,c}/P_{Rd,c}$ vs TRF (tiempo de resistencia al fuego) y se agruparon aquellas coincidentes o cercanas. En la tabla 3 se muestra como ejemplo las características de cada grupo para vigas sin revestimiento contra incendio. Para las vigas con revestimiento contra incendio quedaron conformados 8 grupos dada la mayor cantidad de combinaciones existentes (162).

Tabla 3. Grupos para el diseño a elevadas temperaturas por el método gráfico alternativo en vigas sin revestimiento contra incendio

Grupo	Ancho (mm)	h_{sc} (mm)
1	50	76,2
2	100	76,2
	50	101,6
3	150	72,6
	100	101,6
	50	127,0
4	150	101,6
	100	127,0
5	50	127,0

En las figuras 3 y 4 se pueden observar los gráficos que permiten determinar la resistencia de la conexión mecánica tipo canal a elevadas temperaturas para un tiempo de resistencia al fuego requerido de acuerdo a su resistencia a temperatura ambiente.

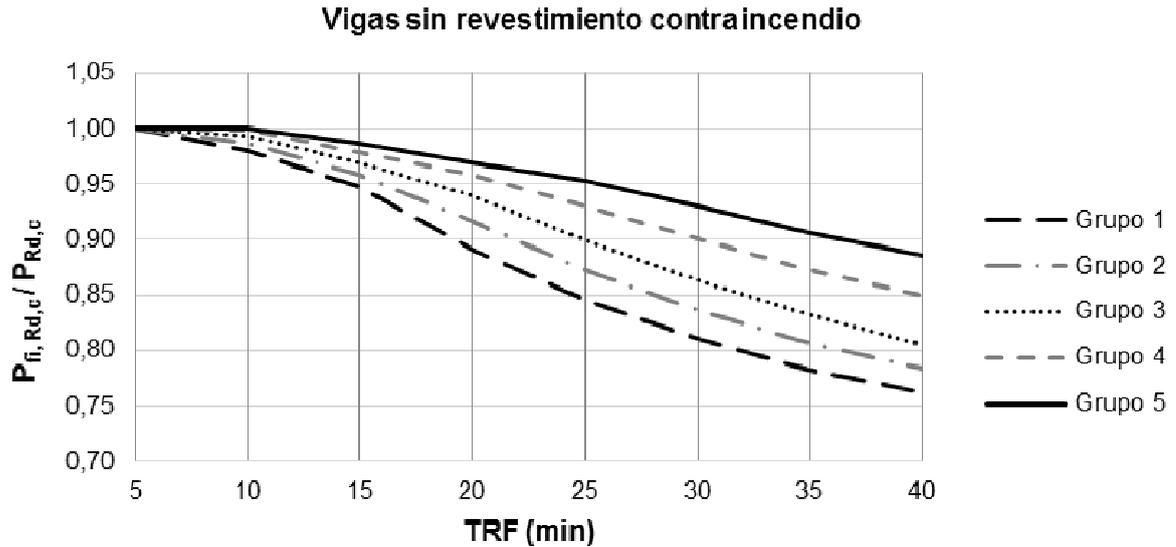


Fig. 3. Gráfico para determinar la resistencia de la conexión mecánica tipo canal a elevadas temperaturas en vigas sin revestimiento contra incendio

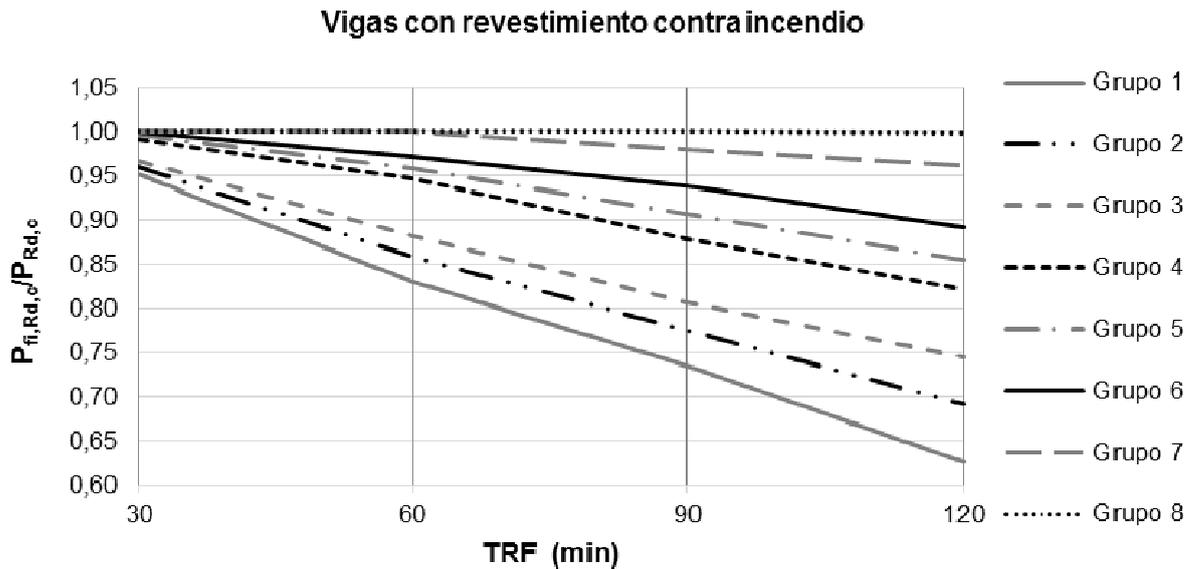


Fig. 4. Gráfico para determinar la resistencia de la conexión mecánica tipo canal a elevadas temperaturas en vigas con revestimiento contra incendio

El método gráfico alternativo es de fácil y rápida utilización según la siguiente secuencia:

- 1- Calcular la resistencia a temperatura ambiente ($P_{Rd,c}$) de la conexión mecánica tipo canal.
- 2- Definir a qué grupo pertenece según las características del conector mecánico tipo canal y del material de revestimiento contra incendio en caso de que lo presente.
- 3- Entrar en el gráfico que corresponda (para vigas sin revestimiento contra incendio o para vigas revestidas) por el eje horizontal según el tiempo de resistencia al fuego (TRF) en el que se desea conocer la resistencia de la conexión a elevadas temperaturas ($P_{fi,Rd,c}$). Trazar una línea paralela al eje vertical hasta intersectar con la curva que representa el grupo definido anteriormente y prolongar la línea desde el punto de intersección con la curva hasta el eje vertical del gráfico para obtener el valor de la relación $P_{fi,Rd,c}/P_{Rd,c}$.
- 4- Una vez conocida la resistencia a la temperatura ambiente de la conexión ($P_{Rd,c}$), solamente es necesario multiplicar este valor por el obtenido en el paso anterior para conocer la magnitud de la resistencia a elevadas temperaturas de la conexión ($P_{fi,Rd,c}$).

Conclusiones

Se describe por primera vez el comportamiento térmico en situación de incendio de las conexiones tipo canal en estructuras compuestas de acero y hormigón, con vigas sin revestimiento contra incendio o con este, tomando en consideración una amplia gama de situaciones de diseño representativas de la práctica constructiva internacional.

Se definen los factores de mayor incidencia en el comportamiento térmico de la conexión objeto de estudio y se demuestra que la altura del conector (h_{sc}) tiene gran influencia en la relación de temperatura θ_c/θ_f y que los valores de ésta son significativamente superiores cuando se emplea revestimiento contra incendio. Por su parte, cuando la temperatura del hormigón se determina a $0,25 h_{sc}$ la influencia del ancho del conector no es significativa en ambos casos, en tanto en vigas con revestimiento contra incendio el factor con más influencia en las relaciones de temperatura para todos los rangos de tiempo analizados fue el espesor del revestimiento.

Finalmente, se proponen valores de las relaciones θ_c/θ_f fundamentados en el análisis térmico realizado y dependientes de los factores de mayor impacto, que aseguran la determinación de la resistencia de la conexión de manera racional y segura, de cara al diseño, a través de su implementación en los métodos propuestos en el trabajo, inexistentes hasta el presente, que tienen como valor adicional la determinación de las temperaturas por métodos avanzados.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a CAPES (Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior) por el soporte ofrecido para el desarrollo de la investigación, por intermedio del proyecto conjunto CAPES - MES 181 /12: "Comportamento e dimensionamento das estruturas em situação de incêndio", desarrollado entre la Universidad de Sao Paulo, Brasil y la Universidad de Camagüey, Cuba. 2012-2015.

Referencias

1. Guo-Qiang L, Wei-Yong W. A simplified approach for fire-resistance design of steel-concrete composite beams. *Steel and Composite Structures*. 2013;14(3):295-312. ISSN 1229-9367.
2. Lee YH, Kim MS, Kim H, et al. Shear resistance of stud connectors in high strength concrete. *Structural Engineering and Mechanics*. 2014;52(4):647-61. ISSN 1225-4568.
3. Qureshi J, Lam D, Ye J. Effect of shear connector spacing and layout on the shear connector capacity in composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011;67:706-19. ISSN 0143-974X.
4. Kim SH, Jung CY, Ahn JH. Ultimate strength of composite structure with different degrees of shear connection. *Steel and Composite Structures*. 2011;11(5):375-90. ISSN 1229-9367.
5. Maleki S, Bagheri S. Behavior of channel shear connectors, Part I: Experimental study. *Journal of Constructional Steel Research*. 2008;64:1333-40. ISSN 0143-974X.
6. Shariati M, Sulong NHR, Suhatri M, et al. Comparison of behaviour between channel and angle shear connectors under monotonic and fully reversed cyclic loading. *Construction and Building Materials*. 2013;38:582-93. ISSN 0950-0618.
7. Martins JP, Neves LF, Vellazco PC. Experimental evaluation of the structural response of perfobondshear connectors. *Engineering Structures*. 2010;32:1976-85. ISSN 0141-0296.
8. Kruppa J, Zhao B. Fire Resistance of Composite Beams to Eurocode 4 Part 1.2. *Journal of Constructional Steel Research*. 1995;33:51-69. ISSN 0143-974X.
9. European Committee for Standardization. Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1994-1-1. Brussels, Belgium: Eurocode 4. 2004.
10. International Organization for Standardization. Fire-Resistance Tests. Elements of building construction, Part 1.1: General requirements for fire resistance testing. ISO 834. Geneva, Switzerland: ISO. Revision of first edition ISO 834:1975. 1990.
11. Standardization ECf. Design of composite steel and concrete structures - Part 1.2: General rules, structural fire design. Eurocode 4: EN 1994-1-2. Brussels, Belgium: 2005.
12. Larrua R, Silva VP. Modelación térmica del ensayo de conexiones acero-hormigón a elevadas temperaturas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia*. 2013;36(3):2010-218. ISSN 0254-0770.
13. Larrua R, Silva V. Thermal analysis of push-out tests at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*. 2013;55:1-14. ISSN 0379-7112.

14. Chen L, Li G, Jiang S. Experimental studies on the behaviour of headed studs shear connectors at elevated temperatures. En: Seventh International Conference of Structures in Fire Zurich. Switzerland. abril 2012 Disponible en: <http://issuu.com/prodweb/docs/rea-vol03-n03?e=1737607/1049897>
15. Choi SK, Han SH, Kim SB, al e. Performance of shear studs in fire. En: International Conference: Applications of Structural Fire Engineering – Prague. abril 2012 Disponible en: <http://issuu.com/prodweb/docs/rea-vol03-n03?e=1737607/10498978>
16. Wang AJ. Numerical investigation into headed shear connectors under fire. Journal of Structural Engineering. 2011;138(1):118-22. ISSN 0733-9445.
17. Wang AJ. Numerical studies on shear connectors in push-out tests under elevated temperatures. Structural Engineering and Mechanics. 2011;39(3):317-38. ISSN 1225-4568.
18. Rodrigues JP, Laim L. Behaviour of perfobond shear connectors at high temperatures. Engineering Structures. 2011;33:2744-53. ISSN 0141-0296.
19. Rodrigues JP, Laim L. Experimental investigation on the structural response of T, T-block and T-perfobond shear connectors at elevated temperatures. Engineering Structures. 2014;75:299-314. ISSN 0141-0296.
20. European Committee for Standardization. Actions on structures - part 1.2: General actions - Actions on structures exposed to fire. Eurocode 1: EN 1991-1-2. Brussels, Belgium. 2002.
21. American Institution of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings. ANSI/AISC 360-10. Chicago: AISC. 2010.