

Simplified methods to determine shear strength in reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymers exposed to fire

Métodos simplificados para la determinación de la resistencia al corte en vigas de hormigón armado con polímeros reforzados con fibras expuestas al fuego

I. Diaz ^{1*}, R. Larrúa ^{***}, H. Wainshtok ^{**}, M. Mackchaser ^{*}

* Technological University of Havana, "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Structures Department – Havana, CUBA

** Technological University of Havana, "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Constructions Department – Havana, CUBA

*** University of Camagüey, "Ignacio Agramonte Loynaz", Faculty of Construction – Camagüey, CUBA

Fecha de Recepción: 13/12/2020

Fecha de Aceptación: 02/03/2021

PAG 97-106

Abstract

The importance of structural design under fire conditions, together with the uncertainty in the behavior and resistance of reinforced concrete structures with fiber-reinforced polymer bars (FRP) at high temperatures, reveal the need for more research along these lines. Although there are studies evaluating the flexural and shear strength of elements exposed to fire, there are no standards nor regulations specifying the procedures thereto. This work proposes methods to calculate shear strength in FRP-reinforced concrete beams, with rectangular cross-section, based on the degradation of the properties of the materials and/or the reduced concrete cross-section, as recommended by (Diab, 2014), Eurocode 2 (EN-1992-1-2, 2004) and (Saafi, 2002). In accordance with the thermal analysis executed with the Super Tempcalc software, these procedures were applied to 13 beams of different dimensions and reinforcements, subjected to standard fire of the ISO-834 standard on three sides, thereby obtaining the shear capacity degradation curves for each case. The results show that the differences between the shear strength values were very small throughout the total fire exposure time.

Keywords: Beam, reinforced concrete, shear, fire, fiber-reinforced polymer (FRP)

Resumen

La importancia del diseño de estructuras expuestas al fuego, junto con la incertidumbre en el comportamiento y resistencia de las estructuras de hormigón armado con barras de polímeros reforzados con fibras (PRF) a elevadas temperaturas, evidencian la necesidad de más investigaciones en este sentido. Aun cuando existen estudios dirigidos a la evaluación de los esfuerzos resistentes de flexión y cortante en situaciones de incendio en estos elementos, no existen normas o regulaciones que especifiquen procedimientos para ello. En este trabajo se proponen métodos para el cálculo de la resistencia al corte en vigas de hormigón armado con PRF, de sección rectangular, a partir de la degradación de las propiedades de los materiales y/o la sección reducida de hormigón, según lo recomendado por (Diab, 2014), el Eurocódigo 2 (EN-1992-1-2, 2004) y (Saafi, 2002). Partiendo del análisis térmico realizado con el programa Super Tempcalc, estos procedimientos se aplicaron en 13 vigas, con distintas dimensiones y armados, sometidas al fuego estándar de la norma ISO-834 (2000) en tres caras, obteniéndose las curvas de degradación de la capacidad a cortante para cada caso. Los resultados demuestran que las diferencias entre los valores de resistencia al corte fueron muy pequeñas para todo el tiempo de exposición al fuego considerado.

Palabras clave: Viga, hormigón armado, cortante, fuego, polímeros reforzados con fibras (PRF)

1. Introducción

El impacto mundial que han generado los polímeros reforzados con fibras (PRF) en la ingeniería civil está dado principalmente por las grandes ventajas que presenta su empleo en la construcción, como son: su alta resistencia a la corrosión, la elevada relación resistencia / peso en comparación con el acero, además de su resistencia a la acción de sustancias químicas y a la fatiga. No obstante, aspectos como su escasa ductilidad, bajo módulo de elasticidad, menor resistencia al cortante y baja resistencia a las elevadas temperaturas, pueden constituir limitantes para su empleo como material de refuerzo en estructuras de hormigón (Wainshtok et al., 2017). En elementos de hormigón armado con PRF, el incremento de la temperatura produce una disminución de la resistencia y la rigidez de las barras, así como la pérdida de adherencia entre la barra y el hormigón, dada fundamentalmente por la degradación de la matriz (Hajiloo et al. 2018); (Özkal, et al., 2018).

¹ Autor de correspondencia:

Technological Universidad of Havana, "José Antonio Echeverría" (CUJAE) – Havana, CUBA
E-mail: iselcarmen@civil.cujae.edu.cu



La mayoría de los estudios experimentales o numéricos que se han realizado hasta la fecha en elementos de hormigón armado con PRF expuestos a fuego, se han centrado en el comportamiento a flexión de los mismos (Adam et al., 2015); (Bilotta et al., 2020); (Gao et al., 2016); (Kodur y Agrawal, 2016); (Petr et al., 2019); (Rafi et al., 2011), siendo pocos aquellos dirigidos a evaluar la resistencia a cortante.

Sin embargo, los eventos de incendios reales han demostrado la gravedad de la falla por cortante debido al fuego, lo que ha llevado a crear una conciencia cada vez mayor de que esta puede ser crítica, pudiendo llegar a ser el modo de falla que gobierna durante el siniestro en los elementos de hormigón armado (Diab, 2014). Modelar la compleja interacción de los mecanismos de resistencia al cortante a elevadas temperaturas es extraordinariamente difícil, ya que el fuego aumenta la altura de las grietas y, por lo tanto, reduce la profundidad de la zona comprimida (Kashwani y Al-Tamimi, 2014). En el caso de elementos de hormigón armado con PRF este fenómeno se ve agudizado, pues la menor rigidez que exhibe este refuerzo conduce a mayores grados de fisuración, lo que trae consigo una disminución de la zona comprimida y consecuentemente, menor aporte del hormigón a cortante (Bywalski et al., 2020).

(Albuquerque y Silva 2013) y (Diab, 2014) concuerdan en que la capacidad a cortante de un elemento expuesto al fuego puede ser evaluada a partir de las metodologías existentes para el diseño a temperatura ambiente, pudiendo considerarse la reducción en la fuerza resistente de los estribos y el hormigón y/o en el área efectiva de la sección transversal por efecto de las altas temperaturas. (Albuquerque y Silva 2013), presentan un procedimiento de cálculo para determinar la degradación de la resistencia a cortante en vigas de hormigón armado con acero basado en la reducción de la sección de hormigón (método de isoterma de 500°C) y la consideración de una región fisurada efectiva, tal como propone el Eurocódigo (EN-1992-1-2, 2004); mientras que (Diab, 2014) formula y valida un método basado en la degradación de las resistencias, a partir del promedio de las temperaturas del refuerzo a cortante y el hormigón para este fin.

En el caso de vigas de hormigón armado con PRF, no existen normas o regulaciones que especifiquen procedimientos para el diseño a elevadas temperaturas. Aun cuando los códigos y directrices de diseño de elementos de hormigón armado con PRF (ACI-440.1R, 2015); (CAN/CSA-S806-12, 2017); (ESCC, 2005) comentan la susceptibilidad de estos materiales al fuego, sólo la CSA S806-12 (CAN/CSA-S806-12, 2017) proporciona una orientación al diseñador, brindando recomendaciones para losas en cuanto al recubrimiento de hormigón necesario para conseguir una resistencia al fuego específica para un armado de PRF, conocida su temperatura crítica.

Para vigas de hormigón armado con PRF, (Saafi, 2002), brinda un método de diseño tomando como base la misma filosofía que se emplea cuando se refuerza con acero. El autor determina la degradación de la resistencia del PRF a partir de la temperatura promedio en el estribo. Para el hormigón tiene en cuenta una reducción en su resistencia y a la vez, reduce la sección según la isoterma de 700°C, consideración esta, no justificada ni referenciada.

La posibilidad real del fallo de las estructuras por cortante durante un siniestro, en particular aquellas de hormigón armado con PRF, caracterizados por una menor resistencia al corte que el acero; así como la ausencia en la literatura técnica internacional de métodos simplificados validados para la evaluación de la capacidad al corte de vigas de hormigón armado con PRF en situación de incendio, conllevan a la necesidad de identificar procedimientos confiables y simples que permitan estimar dicha capacidad.

En este trabajo son presentados y comparados métodos de cálculo disponibles en la literatura para la evaluación de la degradación de la resistencia a cortante en vigas de hormigón armado en situación de incendio, con el objetivo de identificar un procedimiento analítico simplificado, aplicable a aquellos casos donde se empleen barras de PRF como refuerzo del hormigón.

2. Discusión y desarrollo

Para el estudio se consideran 13 vigas con diferentes dimensiones, recubrimientos y cuantías de refuerzo (Tabla 1), factores de mayor influencia en la capacidad resistente de vigas de hormigón armado en situación de incendio (Bywalski et al., 2020); (Diab, 2014). De las vigas estudiadas se consideraron 12 reforzadas con barras de PRFV (vigas P), con resistencia a tracción de 800MPa y módulo de elasticidad de 50000MPa; y una armada con acero (A), para poder establecer una comparación y ganar criterios en cuanto al empleo de un método u otro. En todos los casos se supuso hormigón de resistencia a compresión igual a 25MPa.



Tabla 1. Secciones de hormigón armado con PRFV analizadas

Viga	Dimensiones de la sección		Recubrimiento [mm]	Armadura longitudinal		Armadura transversal		
	b (mm)	h (mm)		ρ_L (%)	Bars	b (mm)	h (mm)	
A1	250	400	30	0,66	ACERO 3Ø16	0,32	0,66	
P1	200	300	30	0,66	PRFV 3Ø12	0,40	0,66	
P2	250	300	30	0,66	PRFV 2Ø16	0,32	0,66	
P3		400	30		PRFV 3Ø16	0,32	Ø8@125	
P4						0,29	Ø8@135	
P5						0,27	Ø8@150	
P6		500	30		PRFV 2Ø20 1Ø16	0,32	Ø8@125	
P7		300	400		30	0,38	PRFV 3Ø12	0,38
P8	0,57			PRFV 3Ø16		0,57		
P9	0,89			PRFV 3Ø20		0,89		
P10	350	650	30	0,46	PRFV 3Ø20	0,19	0,46	
P11			40					
P12			50					

Para determinar el cortante resistente de la viga a elevadas temperaturas se empleó la metodología propuesta en el (ACI-440.1R, 2015) para el diseño de elementos de hormigón armado con PRF a temperatura ambiente, modificada para tomar en cuenta los efectos de la temperatura según los métodos propuestos. En la misma, la resistencia a cortante proporcionada por el hormigón (V_c) se evalúa por la (Ecuación 1), mientras que la resistencia al cortante proporcionada por los estribos de PRF, perpendiculares al eje del elemento, se determina mediante la (Ecuación 2):

$$V_c = (0.40k_s)\sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad (1)$$

$$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fv} \cdot d}{s} (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) \quad (2)$$

Siendo:

k_s : profundidad de la línea neutra de la sección fisurada

$$k_s = \sqrt{(n_f \rho_f)^2 + 2n_f \rho_f - n_f \rho_f} \quad (3)$$

n_f : relación entre los módulos de elasticidad del hormigón y el PRF

ρ_f : cuantía geométrica del refuerzo PRF en tracción

f'_c : resistencia a compresión del hormigón

A_{fv} : área total de refuerzo en el alma dentro de un espaciamiento s

f_{fv} : tensión de trabajo del refuerzo transversal de PRF, obtenida como el menor valor entre $0,004E_{fu}$ y la resistencia en la zona de doblado del estribo f_{fb} :

$$f_{fb} = \left(0.05 \frac{r_b}{\phi_c} + 0.3\right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (4)$$

Donde:

r_b es el radio interno de doblado de la barra, ϕ_c es el diámetro nominal de la barra de PRF, y f_{fu} es la resistencia última a tracción de la barra de PRF.



2.1 Análisis térmico

El análisis térmico se realiza mediante modelación numérica, herramienta ampliamente utilizada hasta la fecha en la solución de problemas de ingeniería estructural en situación de incendio como alternativa a los costosos ensayos físicos. Las temperaturas fueron obtenidas por medio del módulo térmico Super Tempcalc, del programa sueco Temperature Calculation and Design (Fire Safety Design, 2007), que permite realizar análisis bidimensionales de estructuras expuestas al fuego y cuya eficacia ha sido demostrada en numerosos estudios previos (Albuquerque y Silva, 2013); (Larrua y Silva, 2013); (Larrua et al., 2015). El calentamiento de las secciones fue modelado por medio de la curva de fuego estándar (ISO-834, 2000) y como condiciones de contorno se supusieron expuestas al fuego las caras laterales e inferior de las vigas. Debido a que la sección transversal presenta una geometría rectangular, la malla quedó definida por elementos rectangulares de cuatro nodos de 0,5 centímetros. La temperatura inicial (ambiente) fue adoptada igual a 20 °C y se consideraron tiempos de exposición al fuego de hasta 135 minutos, definidos en cada caso por el fallo de las secciones analizadas. En la (Figura 1) se muestran los campos de temperaturas e isotermas resultantes de este análisis para la sección de 200 x 300mm, para un tiempo de exposición al fuego de 45 min.

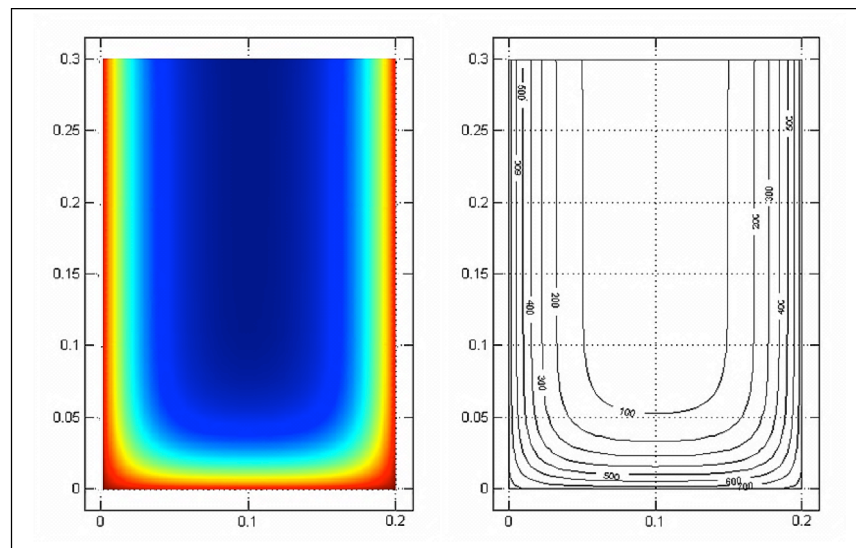


Figura 1. Campo de temperaturas e isotermas de la sección de la viga de 200 x 300mm

Las propiedades físicas y térmicas del hormigón (conductividad térmica, calor específico y densidad) fueron obtenidas del (EN-1992-1-2, 2004), mientras que para las barras de PRF se consideraron las propiedades propuestas por el (ACI-440.1R, 2015) y (Nasreen, 2016).

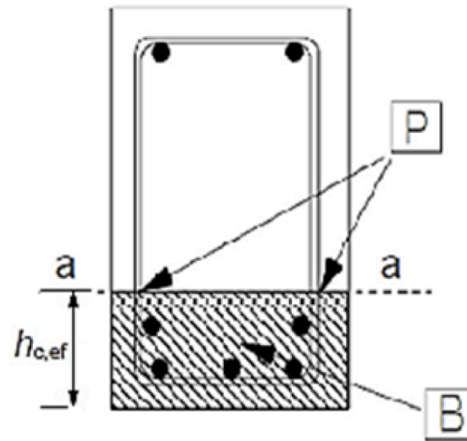
2.2 Análisis mecánico

Se consideraron tres métodos identificados en la literatura, tanto para elementos de hormigón armado con acero como con PRF, cuyas consideraciones para el cálculo del cortante resistente difieren entre sí: el método propuesto por el Eurocódigo 2 (EN-1992-1-2, 2004), reconocido como el documento normativo más completo y actualizado relativo al diseño estructural en situación de incendio; el método por propuesto (Diab, 2014) como resultado de su investigación dirigida a la evaluación de la capacidad a cortante de vigas de hormigón armado con acero en situación de incendio y el método propuesto por (Saafi, 2002) para el caso particular de vigas armadas con PRF.

2.2.1 Método del Eurocódigo 2 (EN-1992-1-2, 2004)

El Eurocódigo 2 presenta un método simplificado en el que se considera la reducción de la resistencia del hormigón por efecto de la temperatura a partir de una disminución de la zona resistente. Dicha reducción está dada bajo el supuesto de que en aquellas zonas donde el hormigón alcanza una temperatura superior a 500°C, este se encuentra demasiado dañado debido a la acción del fuego y es "desechado"; de esta forma la sección reducida, de dimensiones b_t (ancho reducido) y d_t (altura efectiva reducida), será aquella rodeada por la isoterma de 500°C. Además, según la hipótesis adoptada en el método, la resistencia a la compresión característica del hormigón

presente en esta región es la misma considerada a temperatura ambiente ($f'_{c\theta} = f'_c$). En el caso del refuerzo transversal debe tenerse en cuenta que, a diferencia del longitudinal, este posee un gradiente de temperatura cuando las vigas son expuestas al fuego por tres caras. Es por ello que para definir la temperatura en el estribo se considera que las tensiones máximas de los cercos ocurren en las zonas fisuradas, determinándose un área efectiva de la sección transversal del hormigón traccionado, o área favorable a la aparición de grietas. De esta manera se toma como referencia la temperatura en el punto P, localizado en la intersección del límite superior de dicha área con los estribos (Figura 2).



B: área efectiva de la sección en tracción

Figura 2. Punto de referencia para el cálculo de la temperatura en estribos (EN-1992-1-1, 2002)

La altura del área efectiva ($h_{c,ef}$), de acuerdo con EN-1992-1-1 (2002), se calcula como el menor entre los valores resultantes de las (Ecuación 5), (Ecuación 6) y (Ecuación 7):

$$h_{c,ef} < 2.5(h - d) \quad (5)$$

$$h_{c,ef} < \frac{h-x}{3} \quad (6)$$

$$h_{c,ef} < \frac{h}{2} \quad (7)$$

Siendo:

d: altura efectiva de la sección transversal completa

h: altura de la sección transversal completa

x: profundidad de la línea neutra de la sección transversal completa

2.2.2 Método del promedio de temperaturas.

El método considera la temperatura promedio tanto en el hormigón como en el refuerzo. Para el cálculo de la temperatura en el hormigón, (Diab, 2014) propone y valida un método sobre la base de considerar la temperatura promedio de toda la sección transversal.

En el caso del refuerzo, la temperatura se determina a partir de calcular el promedio de la temperatura de todos los elementos finitos que abarca el área de una de las patas del estribo. El uso de dicho método es justificado ya que la distancia entre los elementos finitos es la misma y las tensiones de corte se asumen constantes a lo largo de la altura del estribo (Diab, 2014).

En función de estas temperaturas se calculan los respectivos factores reductores de la resistencia del hormigón y de la armadura transversal.

2.2.3 Método propuesto por Saafi para vigas armadas con PRF. (Saafi, 2002)

(Saafi, 2002), tiene en cuenta el efecto de la temperatura en la capacidad a cortante del hormigón a partir de considerar una disminución de la zona resistente y una disminución en la resistencia a compresión del hormigón (f_{cT}). El ancho de la sección reducida (b_t) es obtenido al ignorar el hormigón cuya temperatura supera los 700°C, mientras que el factor de degradación de la resistencia a compresión se determina en función de la temperatura promedio de la sección, calculada considerando la temperatura media de cada faja en la que se discretiza la misma (el área fuera de los 700 ° C se incluye como cero). La degradación de la resistencia a cortante del refuerzo se calcula a partir de la temperatura promedio de la pata del estribo.

2.3 Cortante resistente a elevadas temperaturas.

Los tres procedimientos presentados fueron aplicados a las secciones descritas en la (Tabla 1), obteniéndose los valores de cortante resistente a elevadas temperaturas, para cada una de las secciones analizadas (Tabla 2). El factor de reducción de la resistencia a compresión del hormigón se extrajo del (EN-1992-1-2, 2004), mientras que para el PRFV se consideraron los factores de reducción de resistencia y módulo de elasticidad, propuestos por (Blontrocket al., 1999) y tomados de (Saafi, 2002).

Tabla 2. Resumen de los resultados de los cortantes resistentes a elevadas temperaturas para las secciones de hormigón armado con PRFV analizadas

Viga	Tiempo de exposición al fuego (min)	Cortante resistente a elevada temperatura ($V_{n,\theta}$) [kN]					
		EC -2	Temperatura promedio	Δ EC- 2-T. prom (%)	Saafi	Δ EC- 2-Saafi (%)	Δ T. prom -Saafi (%)
A1	45	121,80	124,50	2,17	123,9	1,7	0,48
P1	45	24,19	25,97	6,85	25,56	5,36	1,58
P2	45	25,63	27,25	5,94	27,09	5,39	0,59
P3	45	40,12	42,98	6,65	42,41	5,40	1,33
P4	45	38,54	41,23	6,52	40,66	5,21	1,38
P5	45	36,58	39,10	6,45	38,53	5,06	1,48
P6	45	53,72	59,16	9,19	57,15	6,00	3,40
P7	60	16,72	21,50	22,23	21,24	21,28	1,21
P8	60	19,46	24,82	21,60	24,47	20,47	1,41
P9	60	24,53	27,92	12,14	27,48	10,74	1,58
P10	70	11,88	27,89	57,39	27,45	56,71	1,58
P11	70	50,82	57,92	12,27	56,95	10,77	1,68
P12	70	79,29	83,94	5,53	83,01	4,48	1,10



El análisis de los resultados permite apreciar que los valores obtenidos por el método de las temperaturas promedio, recomendado por (Diab, 2014), resultan ser en todos los casos, independiente de las dimensiones de la sección y cuantías de refuerzo, bastante similares a los determinados por el método propuesto por (Saafi, 2002), no apreciándose diferencias mayores del 4%, aun cuando consideran premisas distintas para el cálculo del cortante resistente del hormigón.

Se observó que los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta en el Eurocódigo 2 estaban en todos los casos por debajo de los valores calculados por los otros procedimientos, a favor de la seguridad, lo cual puede ser explicado teniendo en cuenta que este se basa en premisas más elementales que los demás. Esta diferencia se hace más notable a medida que aumentan los tiempos de exposición al fuego.

Además, se pudo constatar que las diferencias encontradas entre el empleo de una metodología u otra en vigas de hormigón armado con PRF, así como su comportamiento ascendente con el incremento del tiempo de exposición al fuego, son similares a las obtenidas en vigas de hormigón armado convencional (Figura 3).

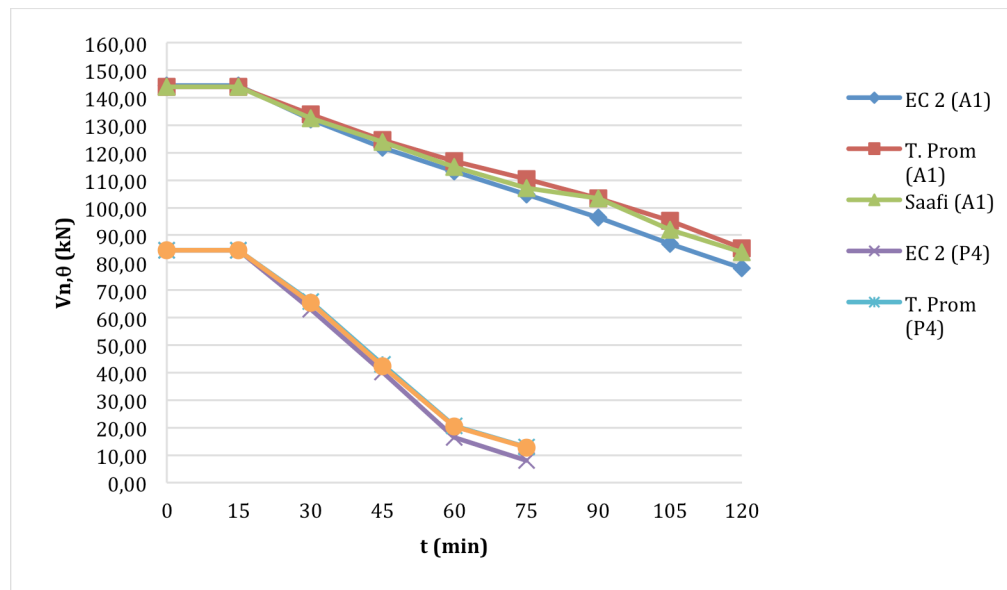


Figura 3. Variación del cortante resistente a elevadas temperaturas en vigas A1 y P4 (250x 400mm)

El estudio demostró también que cuando se emplean recubrimientos pequeños el EC-2 resulta mucho más conservador que los otros métodos considerados, obteniéndose valores de capacidad resistente del orden de la mitad de los obtenidos por el método del promedio de las temperaturas o el propuesto por Saafi (Saafi, 2002). De igual forma, se aprecia una mejor aproximación entre los métodos analizados al emplear mayores diámetros de barras y menores peraltos de viga.

La influencia de estos parámetros en la degradación de la resistencia a cortante para los métodos considerados se puede apreciar en las (Figura 4), (Figura 5) y (Figura 6).



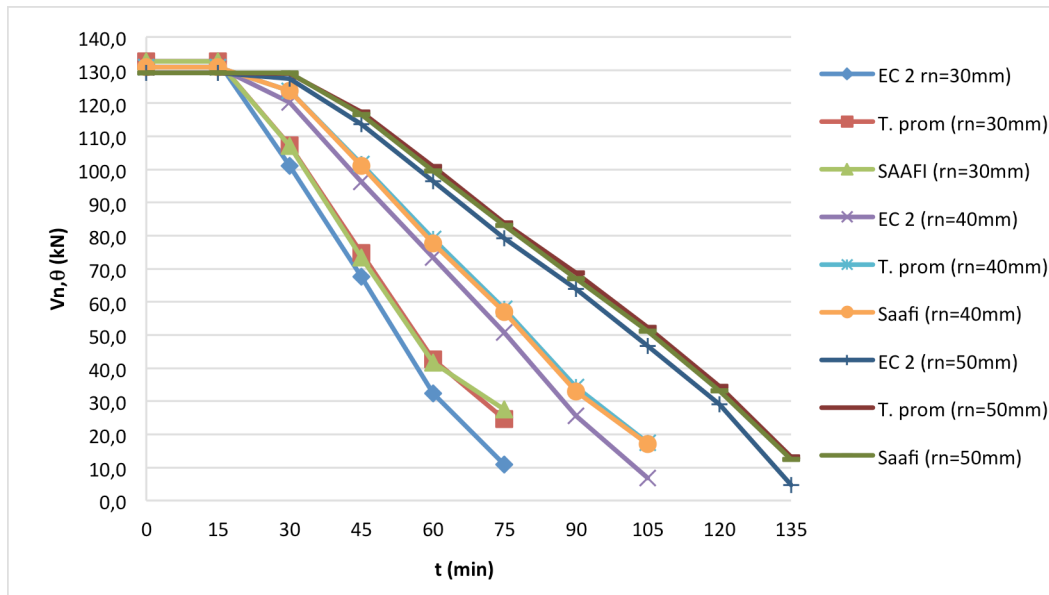


Figura 4. Variación del cortante resistente a elevadas temperaturas en vigas P11, P12 y P13 (350 x 650mm, $r_n=30, 40, 50\text{mm}$)

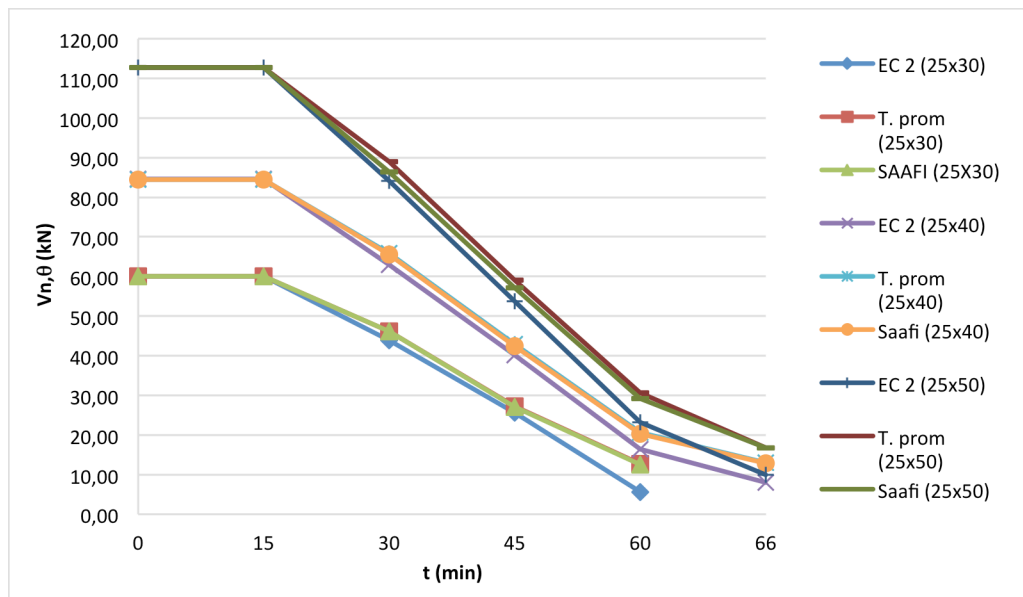


Figura 5. Variación del cortante resistente a elevadas temperaturas en vigas P3, P4 y P7 (b=250mm; h=300, 400, 500mm)



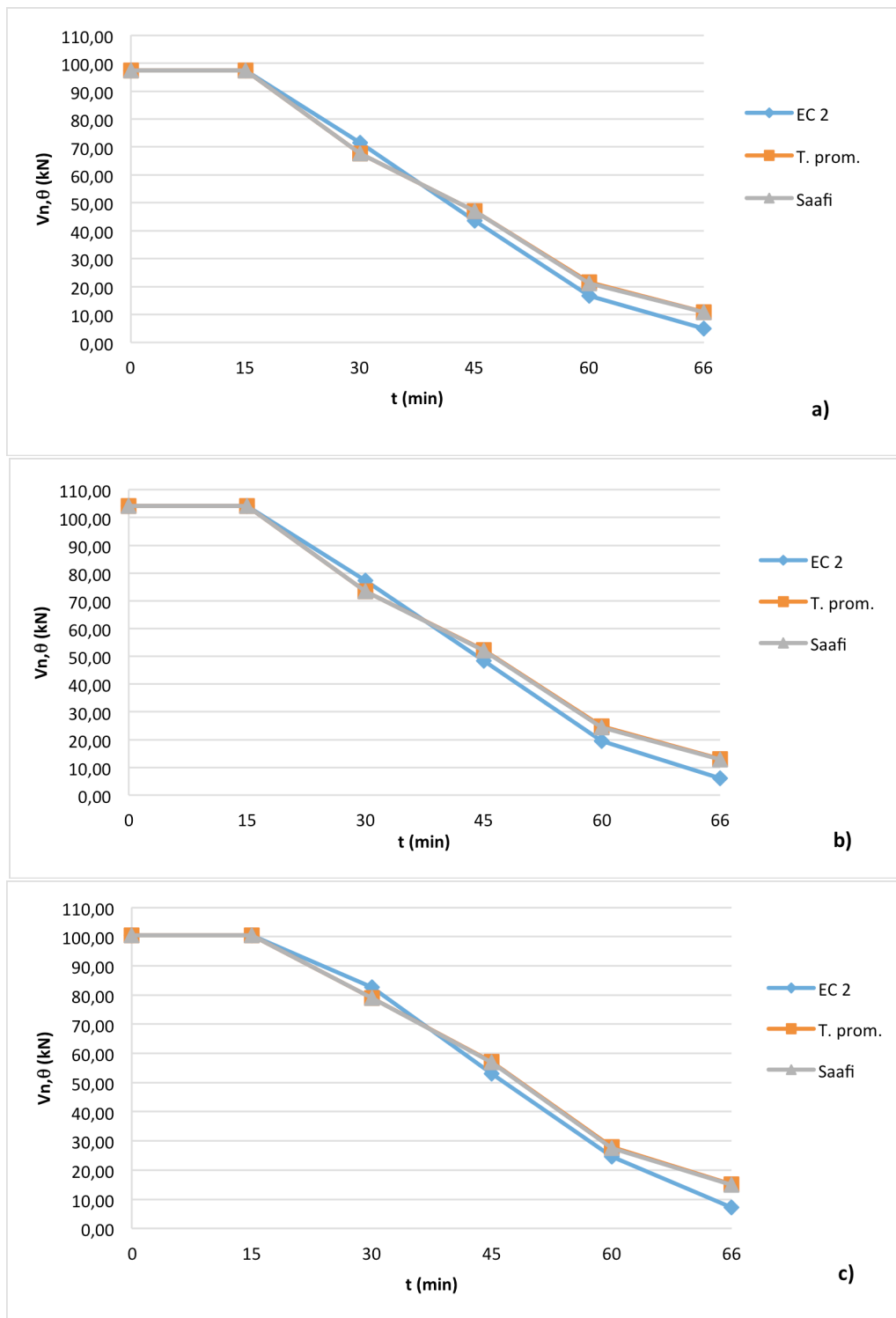


Figura 6. Variación del cortante resistente a elevadas temperaturas en vigas P8, P9 y P10 (300 x 400mm; 3Ø12, b) 3Ø16 y c) 3Ø20)



3. Conclusiones

En este trabajo se analizaron tres procedimientos para determinar el cortante resistente en situación de incendio de vigas de hormigón armado con PRF, aplicado a 13 vigas con diferentes dimensiones y cuantías de refuerzo longitudinal y transversal. En base a los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Los métodos reconocidos para el cálculo del cortante resistente a elevadas temperaturas en vigas de hormigón armado con acero, son válidos y pueden ser aplicados cuando se decide reforzar con barras de PRF.
- El (EN-1992-1-2, 2004) resulta el más conservador de los tres procedimientos, prediciendo adecuadamente la resistencia a cortante de vigas de hormigón armado con PRF en situación de incendio, por lo que en ausencia de ensayos que permitan corroborar estos resultados, los autores recomiendan emplear este método para estimar la capacidad a cortante de estos elementos.

4. Referencias

- ACI-440.1R. (2015).** Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforcing with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (Vol. 1, pp. 88). Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.
- Adam, M. A.; Said, M.; Mahmoud, A. A.; Shanour, A. S. (2015).** Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. *Construction and Building Materials*, 84, 354-366.
- Albuquerque, G. B.; Silva, V. P. (2013).** Verificação ao cisalhamento em vigas de concreto armado em situação de incêndio. Paper presented at the 55º Congresso Brasileiro do Concreto, Brazil.
- Bilotta, A.; Compagnone, A.; Esposito, L.; Nigro, E. (2020).** Structural behaviour of FRP reinforced concrete slabs in fire. *Engineering Structures*, 221, 111058.
- Blontrock, H.; Taerwe, L.; Matthys, S. (1999).** Properties of fiber reinforced plastics at elevated temperatures with regard to fire resistance of reinforced concrete members. Fourth International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Baltimore, American Concrete Institute (ACI), 12.
- Bywalski, C.; Drzazga, M.; Kazmierowski, M.; Kamiński, M. (2020).** Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with a New Type of Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcement: Experimental Study. *Materials*, 13(5), 1159.
- CAN/CSA-S806-12. (2017).** Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers (Vol. S806-12, pp. 198). Mississauga, Ontario, Canada: Canadian Standards Association.
- Diab, M. (2014).** Shear capacity of reinforced concrete beams at elevated temperatures. (Master of Engineering Science), University of Western Ontario, Western Ontario, Canada.
- EN-1992-1-1. (2002).** Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings (pp. 82). Brussels: Comité Européen de Normalisation.
- EN-1992-1-2. (2004).** Design of concrete structures. Part 1-2: General rules-Structural fire design. (pp. 101).
- ESCC. (2005).** Egyptian code of practice for the use of fiber reinforced polymer (FRP) in the construction fields The use of fiber reinforced polymer (FRP) in the construction fields (Vol. Code No. ECP 208-2005 pp. 166). Egypt.
- Gao, W.-y.; Dai, J.-g.; Teng, J. (2016).** Fire resistance of RC beams under design fire exposure.
- Hajiloo, H.; Green, M. F.; Gales, J. (2018).** Mechanical properties of GFRP reinforcing bars at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 162, 142-154.
- ISO-834. (2000).** Fire-resistance tests — Elements of building construction ISO 834. Switzerland.
- Kashwani, G. A.; Al-Tamimi, A. K. (2014).** Evaluation of FRP bars performance under high temperature. *Physics Procedia*, 55, 5. doi: 10.1016/j.phpro.2014.07.043
- Kodur, V. K.; Agrawal, A. (2016).** An approach for evaluating residual capacity of reinforced concrete beams exposed to fire. *Engineering Structures* Volume 110, 1 March 2016, Pages 293-306 www.elsevier.com/locate/engstruct, 110, 14. doi: 10.1016/j.engstruct.2015.11.047
- Larrua, R.; Silva, V. P. (2013).** Thermal modelling of the steel-concrete connections test at elevated temperatures. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 36(3), 9.
- Larrua, Y.; Larrua, R.; Silva, V. P. (2015).** Diseño de conexiones tipo perno en vigas compuestas de acero y hormigón en situación de incendio. *Revista Ingeniería de Construcción*, 30(14), 39-52.
- Nasreen, M. K. (2016).** Numerical Study of FRP Reinforced Concrete under Fire Exposure. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 5(Issue 9), 10.
- Özkal, F. M.; Polat, M.; Yağan, M.; Öztürk, M. O. (2018).** Mechanical properties and bond strength degradation of GFRP and steel rebars at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 184, 45-57.
- Petr, D.; Iva, R.; Ondřej, K. (2019).** Experimental Study of Concrete Beams Reinforced with GFRP Rebars Exposed to High Temperatures. *Key Engineering Materials*, 808, 177-182. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.808.177
- Rafi, M.; Nadjai, A.; Ali, F.; O' Hare, P. (2011).** Evaluation of thermal resistance of FRP reinforced concrete beams in fire. *Structural Fire Engineer*, 2(2), 91-707.
- Saafi, M. (2002).** Effect of fire on FRP reinforced concrete members. *Composite Structures*. 58. 11-20. 10.1016/S0263-8223(02)00045-4
- Wainstok, H. R.; Hernández, J. A.; Díaz, I. (2017).** Calidad y durabilidad de las Construcciones. El uso de los PRF como refuerzo del hormigón armado y el ferrocemento. (U. P. d. Valencia Ed.). Valencia, Spain.

