

Evaluación crítica del empleo de barras de polímeros reforzadas con fibras en situación de incendios

Critical evaluation of the use of polymer bars reinforced with fibers in a fire situation



Michael Roberto Mackchaser Vedey¹, Isel del Carmen Díaz Pérez²

¹Ing. Civil, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. CP 11500, La Habana, Cuba E-mail: mrobmackv@civil.cujae.edu.cu

²Msc. Ing. Civil, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. CP 11500, La Habana, Cuba, E-mail: iselcarmen@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

Las barras de polímeros reforzados con fibras (PRF) se utilizan cada vez más en la industria de la construcción como una alternativa potencial al acero gracias a las ventajas que presentan sus propiedades físico-mecánicas, su alta resistencia a la corrosión y su elevada relación resistencia/peso, en comparación con el refuerzo ordinario. No obstante, aspectos como su escasa ductilidad, su bajo módulo de elasticidad y la baja resistencia a las elevadas temperaturas, constituyen reales preocupaciones que están obstaculizando la aceptación general del material en la actualidad. Para ello, el presente artículo brinda una revisión de las investigaciones existentes hasta la fecha, que estudian el comportamiento y las propiedades tanto del PRF en sí, como del refuerzo integrado al hormigón, en elementos en situación de incendio. También se presentan los resultados de estudios experimentales y numéricos realizados por varios investigadores para elementos de hormigón armado con PRF (vigas, columnas, losas) a temperaturas elevadas. Finalmente se discuten las pautas para el diseño disponibles en las literaturas. En el trabajo se evidencia que tanto la resistencia como la rigidez de las barras sufren una disminución significativa cuando la temperatura alcanza valores superiores a la temperatura de transición vítrea (T_g) del material, la cual oscila entre los 93 a 120 °C para las resinas utilizadas en la mayoría de las barras de PRF que se emplean como refuerzo del hormigón.

Palabras claves: PRFV, PRFA, PRFC, hormigón, exposición al fuego

ABSTRACT

Fiber-reinforced polymer (FRP) bars are increasingly used in the construction industry as a potential alternative to steel thanks to the advantages of their physical-mechanical properties, their high resistance to corrosion and their high strength ratio/weight, compared to ordinary reinforcement. However, aspects such as its low ductility, its low modulus of elasticity and its low resistance to high temperatures, are real concerns that are hampering the general acceptance of the material today. To this end, this article provides a review of existing research to date, which studies the behavior and properties of both the FRP itself, and the reinforcement integrated into the concrete, in elements in a fire situation. The results of experimental and numerical studies carried out by several researchers for elements of reinforced concrete with FRP (beams, columns, slabs) at elevated temperatures are also presented. Finally, the design guidelines available in the literatures are discussed. In the work it is evidenced that both the resistance and the rigidity of the bars suffer a significant decrease when the temperature reaches values higher than the glass transition temperature (T_g) of the material, which ranges between 93 to 120 °C for resins used in most of the FRP bars that are used as reinforcement of concrete.

Keywords: GFRP, AFRP, CFRP, Concrete, Fire Exposure

Nota Editorial: Recibido: agosto 2021; Aceptado: septiembre 2021

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo de la construcción, el uso de refuerzos de barras de polímeros reforzados con fibras (PRF) como refuerzo del hormigón toma auge a principios de los años 90 [1, 2] y desde entonces se ha mostrado gran interés en su fabricación debido a sus ventajas sobre el acero.

El refuerzo de PRF puede llegar a resultar económicamente competitivo ya que tiene alta resistencia a la corrosión; posee una elevada relación resistencia- peso (la décima parte de su peso), presenta transparencia magnética, puede doblar su resistencia a tracción respecto a la del acero, tiene baja conductividad térmica y eléctrica, alta resistencia a la fatiga, y permite reducir los costos de mantenimiento en más del 80% a largo plazo. El empleo de barras de PRF como refuerzo en el hormigón incrementa el tiempo de servicio de las edificaciones en dos o tres veces, en comparación con aquellas que emplean armaduras metálicas, especialmente cuando actúan en un ambiente agresivo, en particular los que contienen sales, álcalis y ácidos [1-6].

En cuanto a sus desventajas pueden citarse que no alcanza a fluir antes de la ruptura (colapso frágil), presenta bajo módulo de elasticidad y es un material anisotrópico, lo cual conlleva a que tenga mucha menor resistencia a tracción que a compresión y que el módulo de elasticidad a compresión sea menor que el de tracción. Otra limitación del refuerzo es su baja resistencia a las elevadas temperaturas debido en gran medida a la composición de sus materiales [1, 7, 8].

La resistencia al fuego de elementos de hormigón armado con barras de PRF es un área extremadamente importante que debe investigarse antes de implementar el uso de estos en edificaciones. Aunque se ha demostrado que el comportamiento de las estructuras de hormigón reforzado con PRF a temperatura ambiente es satisfactorio, todavía falta información sobre el comportamiento de estos a altas temperaturas, aun cuando se conoce que resiste mucho menos que el acero en esta situación [9-11].

Las armaduras de PRF se emplean con índices competitivos ventajosos en construcciones industriales, civiles, viales y agrícolas de hormigón, lo mismo ligeros que de peso normal. Han demostrado su aptitud en edificios de mampostería reforzados (incluyendo, cimentaciones, vigas zapatas, vigas de cerramiento), obras marítimas y portuarias, canalizaciones, mejoramiento del terreno y drenajes (como recubrimiento de canales y taludes), en pavimentos rígidos de hormigón armado y defensa de los viales, entre otras aplicaciones [12-14].

Otras aplicaciones, como construcciones costeras, el refuerzo de losas de tableros de puentes, diversas construcciones prefabricadas y adiciones a las salas de resonancia magnética de hospitales, también son cada vez más frecuentes [1, 13, 15].

El uso de refuerzos de PRFV en Europa comenzó en Alemania con la construcción de un puente de autopista de PRFV pretensado en 1986. Desde la construcción de este puente, se han implementado programas para aumentar la investigación y el uso de refuerzos en PRF de manera general en Europa [16].

En Canadá, hubo un aumento notable en el uso de barras PRF, hasta finales de la primera década del 2000 se habían construido con éxito más de 200 estructuras de puentes, las cuales han estado en servicio durante más de 10 años sin signos de deterioro del refuerzo [17].

En Estados Unidos algunos de los proyectos más relevantes incluyen el Edificio Gonda en la Clínica Mayo en Rochester; el Instituto Nacional de Salud en Bethesda, para aplicaciones de resonancia magnética; el puente en RM 1061 en Sierrita de la Cruz Creek en el condado de Potter y el puente en 53rd Avenue en Bettendorf, para aplicaciones de refuerzo de cubierta [16].

En Cuba, se han empleado en la construcción del edificio de imagenología del hospital CIMEQ y la piscina del hotel Royaltón en Varadero, y en la reconstrucción de la termoeléctrica Antonio Guiteras en Matanzas.

Por otro lado, el impulso dado a estas construcciones ha promovido el desarrollo de múltiples actividades e investigaciones dirigidas a la implementación de códigos o directrices para el diseño de elementos de hormigón armado con barras de PRF. En la actualidad son varios los países que cuentan con guías oficiales para esta tipología de refuerzo (CAN/CSA [18], ACI 440.1R [1], Código egipcio [19]). Sin embargo, a pesar de que todas comentan la susceptibilidad de los PRF al fuego, solo la CAN/CSA [18] proporciona una orientación real al diseñador, refiriéndose solo al diseño de losas, mientras que el ACI 440.1R [1] recomienda que el armado no se utilice en estructuras donde la resistencia a fuego sea esencial para mantener la integridad estructural.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, la presente revisión tiene como objetivo realizar una evaluación crítica de las investigaciones existentes referidas al comportamiento de los PRF en situación de incendio, profundizando

en las propiedades mecánicas y térmicas de las barras cuando son sometidas a elevadas temperaturas.

2. Propiedades de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF) a elevadas temperaturas

2.1. Propiedades mecánicas

La reducción en las propiedades mecánicas de PRF debido a las altas temperaturas depende principalmente de la composición específica y las propiedades de la matriz y las fibras de refuerzo [11, 20]. Cuando la barra de PRF llega a una temperatura superior a la temperatura de transición vítrea (T_g), definida como la temperatura a partir de la cual las propiedades del compuesto dejan de permanecer estables, comienza a perder sus propiedades mecánicas [1, 2]. La temperatura de transición del polímero varía en función del tipo de resina y el proceso de fabricación, por lo que es prácticamente imposible hacer generalizaciones con respecto a los rangos de temperatura seguros para los PRF actualmente disponibles para aplicaciones estructurales [21]. El ACI-440 [1] refiere para las resinas utilizadas en la mayoría de las barras de PRF que se emplean como refuerzo del hormigón, valores de temperatura de transición vítrea en el rango de 93 a 120°C. Una vez que se supera esta temperatura, la adherencia química entre la resina y la fibra se pierde, dando lugar a la formación de micro fisuras en el elemento [13].

El tipo de fibra también influye en el desempeño frente al fuego de los elementos reforzados con PRF; todos los materiales de PRF experimentarán reducciones significativamente diferentes en las propiedades mecánicas y de adherencia a temperaturas elevadas [22]. Los tres tipos de fibra comúnmente utilizados (vidrio, carbón y aramida) tienen propiedades mecánicas drásticamente diferentes a elevadas temperaturas. En el caso de las fibras de aramida, la degradación se inicia aproximadamente a 510 °C, por la descomposición térmica de sus ligaduras, alcanzándose la degradación térmica completa cerca de los 575 °C. Las fibras de vidrio por su parte tienen una temperatura de servicio recomendada de aproximadamente 300°C, más se mantienen resistentes y rígidas hasta aproximadamente los 600°C, mientras que las fibras de carbono pueden resistir fácilmente temperaturas por encima de 1000°C [7, 13, 23].

Hasta la fecha se han llevado a cabo numerosos estudios con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas de los PRF a elevadas temperaturas [24]. La generalidad de ellos concluye que, a elevadas temperaturas, la reducción en la resistencia a la tracción que experimentan las barras es prácticamente lineal. (Figura 1)

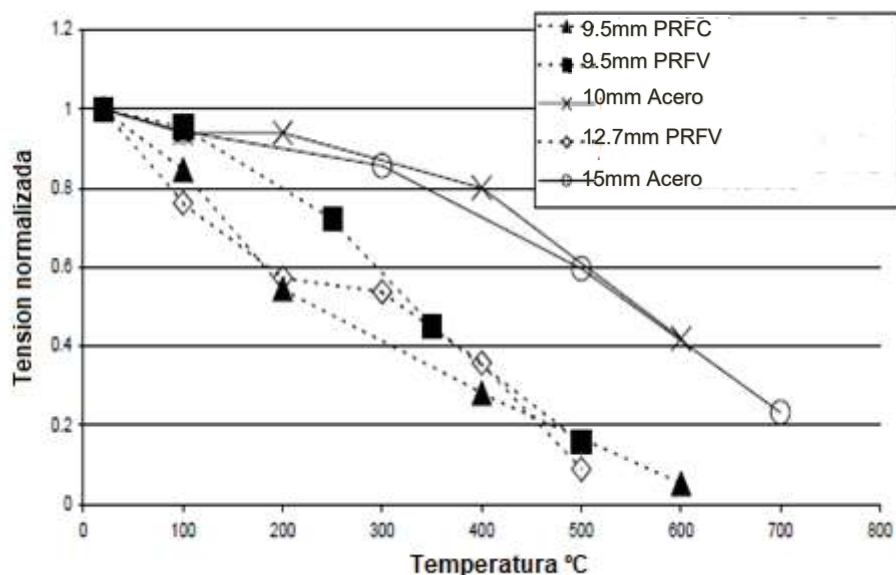


FIGURA 1: VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN EN BARRAS DE REFUERZO DE ACERO, PRFC Y PRFV [25]

Saafi [26] y Bisby [27], sobre la base de los resultados experimentales de Blontrock, presentan una expresión (ecuación 1) que permite determinar los valores de resistencia a la tracción final minorada de las barras de

refuerzo PRF debido a la temperatura:

$$f_{fuT} = k_f(\theta) \cdot f_{fu20} \quad (1)$$

Siendo:

$k_f(\theta)$: Factor de reducción de la resistencia a la tracción de la barra de PRF para una temperatura (θ) bajo las condiciones de resistencia al fuego.

La variación del factor de reducción de la resistencia a la tracción del PRF a elevadas temperaturas $k_f(\theta)$ en función de las temperaturas, se muestra en la figura 2.

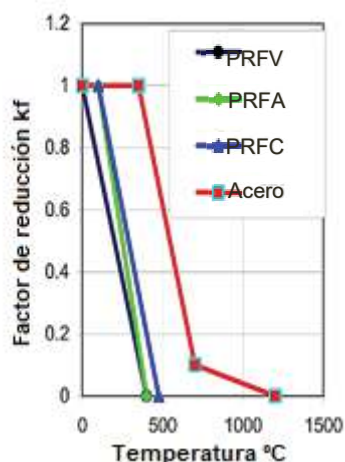


FIGURA 2: FACTOR DE REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN A ELEVADAS TEMPERATURAS. PRF Y ACERO [28]

Los valores de reducción de la resistencia en función de la temperatura (K_f), pueden obtenerse mediante las siguientes expresiones (ecuación 2-9), en función del tipo de fibra analizada:

Para barras de refuerzo PRFV:

$$K_f = (1 - 0,0025T) \quad \text{para } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$K_f = 0 \quad \text{para } 400^\circ\text{C} \leq T \quad (3)$$

Para barras de refuerzo PRFA:

$$K_f = 1 \quad \text{para } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$K_f = (1,333 - 0,00333T) \quad \text{para } 100^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$K_f = 0 \quad \text{para } 400^\circ\text{C} \leq T \quad (6)$$

Para barras de refuerzo PRFC:

$$K_f = 1 \quad \text{para } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \quad (7)$$

$$K_f = (1,267 - 0,00267T) \quad \text{para } 100^\circ\text{C} \leq T \leq 475^\circ\text{C} \quad (8)$$

$$K_f = 0 \quad \text{para } 475^\circ\text{C} \leq T \quad (9)$$

De igual manera, proponen valores de degradación del módulo de elasticidad de las barras de refuerzo PRF debido a las elevadas temperaturas, pudiendo obtenerse a partir de la siguiente ecuación (ecuación 10):

$$E_{fT} = k_E \cdot E_{f20} \quad (10)$$

Donde:

E_{f20} y E_{fT} son los módulos de elasticidad del PRF a 20 °C y a la temperatura T °C respectivamente y k_E representa el factor de reducción del módulo de elasticidad. En la figura 3 se muestra como varía el factor de reducción K_E a medida que aumenta la temperatura.

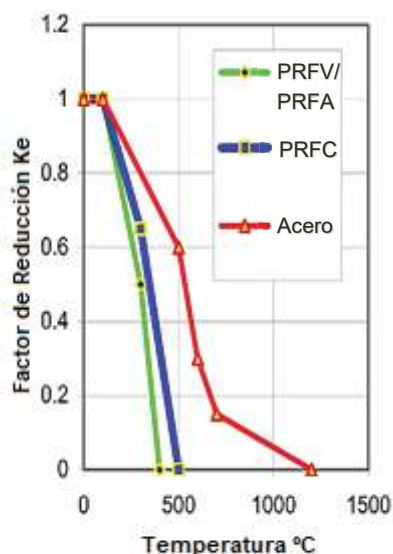


FIGURA 3: FACTOR DE REDUCCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A ELEVADAS TEMPERATURAS. PRF Y ACERO [28]

Los factores de reducción $k_E(\theta)$ podrán calcularse según las expresiones (ecuación 11-18), en función del tipo de fibra:

Para barras de refuerzo PRFA y PRFV:

$$K_E = 1 \quad \text{para } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \quad (11)$$

$$K_E = (1,25 - 0,0025T) \quad \text{para } 100^\circ\text{C} \leq T \leq 300^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$K_E = (2,0 - 0,005T) \quad \text{para } 300^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \quad (13)$$

$$K_E = 0 \quad \text{para } 400^\circ\text{C} \leq T \quad (14)$$

Para barras de refuerzo PRFC:

$$K_E = 1 \quad \text{para } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \quad (15)$$

$$K_E = (1,175 - 0,00175T) \quad \text{para } 100^\circ\text{C} \leq T \leq 300^\circ\text{C} \quad (16)$$

$$K_E = (1,625 - 0,00325T) \quad \text{para } 300^\circ\text{C} \leq T \leq 500^\circ\text{C} \quad (17)$$

$$K_E = 0$$

$$\text{para } 500^{\circ}\text{C} \leq T$$

$$(18)$$

Estudios realizados por Ashrafi et al. [7], Hamad et al. [20], Y.C Wang et al.[29] demuestran que el comportamiento de las barras de PRF a elevadas temperaturas, al igual que a temperatura ambiente, es casi lineal hasta la rotura. Las figuras 4 y 5 muestran ejemplos de relaciones tensión-deformación para las barras de refuerzo de PRFV y PRFC, respectivamente.

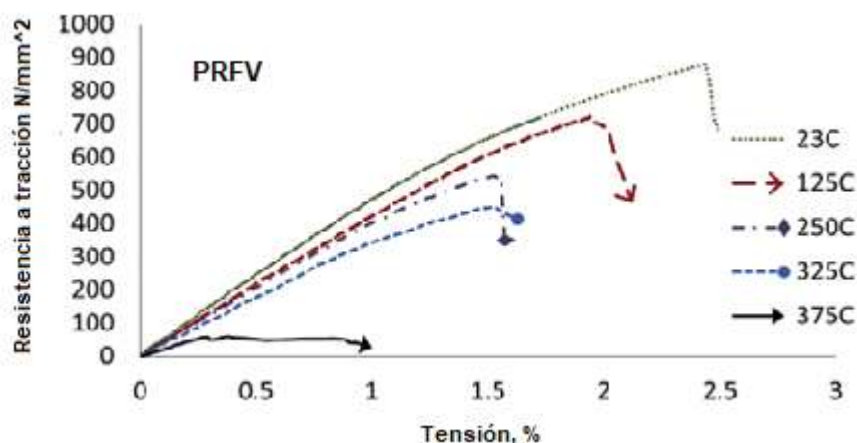


FIGURA 4: RELACIÓN TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE BARRAS DE PRFV PARA DIFERENTES TEMPERATURAS [20]

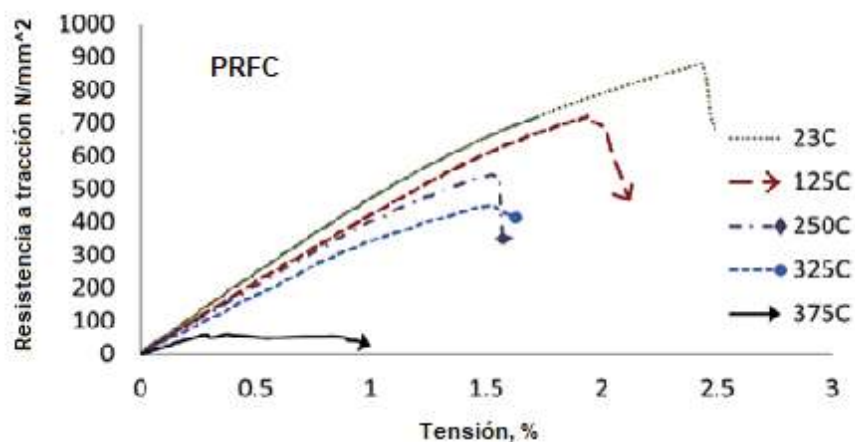


FIGURA 5: RELACIÓN TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE BARRAS DE PRFC PARA DIFERENTES TEMPERATURAS [20]

2.2 Propiedades térmicas

Hasta el momento, las principales razones para usar PRF en aplicaciones estructurales se han relacionado con sus altas propiedades mecánicas, así como con su bajo peso en comparación con el acero. Sin embargo, la baja conductividad térmica hace que el PRF también sea buen candidato para aplicaciones de fachada y elementos que requieran esta propiedad [30].

Como consecuencia del carácter anisotrópico del este material, el coeficiente de expansión térmica (CET) es

diferente en la dirección longitudinal de la transversal y también mayor que la expansión térmica del hormigón endurecido. Los polímeros reforzados con fibras tienen una expansión térmica en la dirección transversal mucho mayor que en la dirección longitudinal (ver tablas 1). En particular, el CET longitudinal, controlado por fibras, es bajo e incluso negativo (como en el caso de las fibras de aramida y carbono), mientras que el CET transversal, controlado por la resina, es de tres a seis veces mayor al del hormigón (el efecto de la temperatura es mayor en las resinas que en las fibras, debido a que las resinas contienen grandes cantidades de carbono e hidrógeno, que son inflamables) [31]. La diferencia entre el coeficiente transversal de expansión térmica de las barras de PRF y el hormigón puede causar grietas dentro del hormigón al aumentar la temperatura y, en última instancia, falla del recubrimiento del hormigón si la acción de confinamiento del hormigón es insuficiente [32].

TABLA 1: COEFICIENTES TÍPICOS DE EXPANSIÓN TÉRMICA DE LAS BARRAS DE REFUERZO [1]

Dirección	CTE, ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)				
	Acero	PRFV	PRFC	PRFA	Hormigón
Longitudinal, α_L	11,7	6,0 a 10,0	-9,0 a 0	-6 a -2	7,2 a 10,8
Transversal, α_T	11,7	21,0 a 23,0	74,0 a 104,0	60,0 a 80,0	7,2 a 10,8

Nota: un coeficiente negativo de expansión térmica indica que el material se contrae con el aumento de la temperatura y se expande con la disminución de esta.

La conductividad térmica de todos los polímeros es baja (ver tabla 2), lo que significa que los PRF son buenos aislantes del calor. Estas propiedades favorables de los materiales compuestos de PRF se deben fundamentalmente a la baja densidad de la matriz de resina utilizada y la alta resistencia de las fibras incrustadas. Además, la alta durabilidad de los PRF garantiza que estos tengan un comportamiento mucho más estable en términos de conductividad térmica y no sufran envejecimiento ni intemperismo [30, 33].

TABLA 2: PROPIEDADES DE LOS PRF [31]

Propiedades	Hormigón	PRFV	PRFC
Conductividad térmica (W/mm K)	$2,7 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$
Calor específico (J/kg K)	722,8	1 310	1 310
Densidad (kg /mm ³)	$2,32 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-6}$

La velocidad de transferencia de calor a través de un PRF depende en gran medida de su calor específico (c_f). Debido a las complejas reacciones químicas que tienen lugar en estos materiales a elevadas temperaturas, es extremadamente difícil determinar la variabilidad del calor específico con la temperatura [27]. En la tabla 2 se muestran valores de calor específico para los polímeros reforzados con fibras de vidrio y carbono.

3. Hormigón armado con barras de PRF en situación de incendio

Los elementos de hormigón armado exhiben buena resistencia a las elevadas temperaturas, lo cual es atribuido fundamentalmente a la baja conductividad térmica, así como la lenta degradación de la resistencia y la rigidez de este material [34]. Cuando se emplean barras de polímeros reforzados con fibras (PRF) como refuerzo del hormigón, la degradación que sufren estas en resistencia y rigidez es menor a la que experimentan de manera individual, ya que el hormigón actúa como protector de las mismas, evitando que las llamas y el oxígeno lleguen a ellas; en ausencia de abundante oxígeno, la fase de ignición de los materiales PRF es menos probable de alcanzar [13].

La resistencia al fuego de un elemento o conjunto estructural particular puede ser determinada completamente a través de ensayos. El procedimiento experimental consiste en someter un elemento estructural a gran escala, bajo una carga de servicio sin factorizar y sostenida, a un incendio estándar en un horno de prueba especializado. El horno está diseñado para reproducir con la mayor precisión posible el fuego estándar, que está representado por una curva de tiempo-temperatura (figura 6) desarrollada específicamente para pruebas de resistencia al fuego y destinada a ser una reproducción conservadora de un incendio severo en edificios [35]. Sin embargo, estos

métodos consumen mucho tiempo y son costosos. Es por ello por lo que, con el uso avanzado de programas computacionales se han desarrollado procedimientos numéricos que pueden predecir con precisión el comportamiento de los elementos estructurales durante un incendio. Estos procedimientos numéricos utilizan información detallada sobre las propiedades térmicas y mecánicas de los materiales constituyentes de los elementos, y tienen el potencial de reducir sustancialmente tanto el tiempo como el gasto de la evaluación de resistencia al fuego.

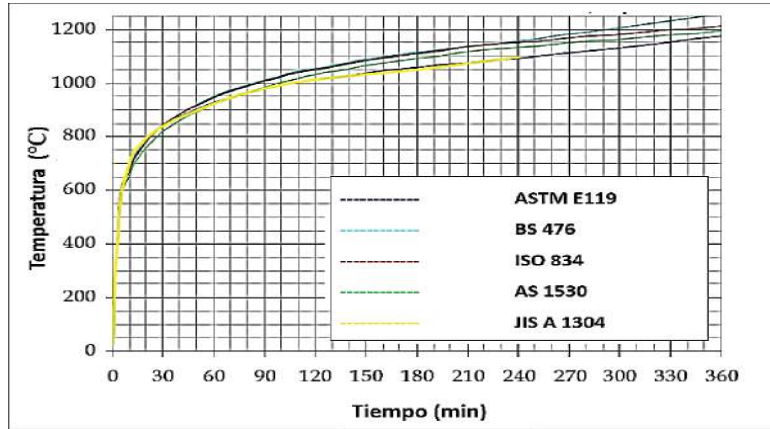


FIGURA 6: CURVAS ESTÁNDAR PARA INCENDIO DE MATERIALES CELULÓSICOS MÁS USADAS EN EL MEDIO TÉCNICO INTERNACIONAL [35]

3.1 Métodos experimentales para el estudio del comportamiento de elementos de hormigón armado con refuerzo de PRF

Los estudios realizados para investigar el comportamiento térmico y estructural de los elementos de hormigón armado con PRF hasta la fecha no son suficientes. Los resultados de los ensayos que se han presentado en la literatura están asociados elementos con geometrías, materiales y cuantías de refuerzo de PRF específicos, y generalmente no son aplicables a muchos elementos diferentes de hormigón armado con PRF [27].

Sakashita M [36], investigó el efecto del fuego en vigas de hormigón armado con barras de PRF de carbono, vidrio y aramida con diferentes texturas superficiales y orientaciones de fibras (trenzadas, en espiral o rectas). El comportamiento de estas vigas es comparado con el de una viga de hormigón armado convencional durante el ensayo de fuego. Todas las muestras se calentaron a 100°C durante tres horas sin carga y luego se calentaron a 1000°C bajo la acción de carga mecánica durante 180 minutos. El estudio concluye que a una temperatura del horno de 350°C, las muestras de PRFA experimentan un aumento repentino de la flecha, produciéndose el fallo a una temperatura del horno de 500°C. Sin embargo, las vigas armadas con PRFV y PRFC, o acero convencional, completan la prueba de 180 minutos sin que se produzca el fallo. Se observa, además, que las deformaciones en el en el centro de las vigas armadas con PRF y la temperatura promedio en la cara inferior asociadas a estas, son inferiores a las obtenidas para armaduras convencionales.

Abbasi and Hogg [37], llevaron a cabo un ensayo a escala real con el objetivo de evaluar la resistencia al fuego de vigas de hormigón armado con barras de PRFV y comparar con una viga de hormigón convencional. Los resultados de los ensayos mostraron que las vigas de hormigón reforzadas con las barras de refuerzo PRFV cumplen los requisitos de diseño de incendios para los tiempos mínimos de resistencia al fuego bajo la acción de cargas, y recomiendan un recubrimiento de hormigón mínimo de 70 mm para el diseño futuro de barras de refuerzo de vigas reforzadas con PRFV en condiciones de incendio.

Bisby et al. [38], estudiaron el efecto de las elevadas temperaturas en las propiedades de adherencia de las barras de PRF en el hormigón a altas temperaturas realizando pruebas de extracción con seis tipos diferentes de texturas superficiales. Ellos encontraron que, hasta temperaturas de 100 °C, no hay una caída notable de la tensión de adherencia, pero por encima de los 100 °C, la tensión de adherencia cae rápidamente.

En el 2007, Rafi, Nadjai y Ali [39] llevaron a cabo un estudio experimental, con el objetivo de investigar el comportamiento de vigas de hormigón armado con barras de PRFC en situación de incendio y comparar la respuesta con una viga armada con acero. Las vigas se instrumentaron para medir temperatura y deformación en el centro de la luz. Las muestras se sometieron a calor por tres caras, estando el grado de calor en

concordancia con la curva estándar ISO 834 y se les aplica la carga hasta la rotura del hormigón en el tope de estas. Durante el ensayo se observó que la matriz polimérica de las barras de refuerzo prácticamente se evapora, dejando expuesta las fibras, las cuales no tienen indicios de quema, por lo que se considera que continúan contribuyendo a la resistencia de la viga. De igual manera, permite concluir que la resistencia de las barras no se ve seriamente afectada por debajo de los 300°C, y el fallo de estas se alcanza a temperaturas mayores de 400°C (más de 60% de degradación de la resistencia).

Özkal et al. [40] llevaron a cabo un estudio experimental con vigas de hormigón armado con acero y PRFV respectivamente para evaluar y comparar la fuerza de adherencia de ambos tipos de refuerzo con el hormigón. Según el estudio, la fuerza de adherencia que experimentan ambos tipos de barras a elevadas temperaturas revela curvas similares y casi lineales. Los autores afirmaron que el rendimiento de las barras de PRFV en esta propiedad es cercano al de las barras de acero en condiciones normales, y sugieren que este material presenta un comportamiento mejor que lo esperado, ante la acción de un incendio.

Hajiloo, et al. [41], evalúan experimentalmente a través de una prueba de fuego estándar a gran escala, la resistencia al fuego de dos losas de hormigón reforzadas completamente con barras de dos tipos de polímeros reforzados con fibra de vidrio (PRFV). Se aplicaron las cargas uniformemente distribuidas provocando un momento de flexión de 45 kNm, que fue el 55% del momento último de resistencia de las losas a temperatura ambiente, y se mantuvo durante toda la prueba de fuego. Ambas losas cargadas soportaron más de tres horas de exposición al fuego estándar ASTM-E119. Además, se estudia la tensión de adherencia, concluyéndose que la mayor parte de esta se pierde a temperaturas en el rango de la temperatura de transición vítrea de las barras y que una longitud de anclaje de 200 mm en las zonas no expuestas (apoyos) es suficiente para garantizar un buen anclaje de las barras.

Más recientemente, Petr D. [42], llevó a cabo un estudio experimental con el objetivo de determinar la influencia del recubrimiento (25, 35 y 45 mm) en el comportamiento de vigas de hormigón armado con barras de PRFV sometidas a las elevadas temperaturas. Como resultado se aprecia que para recubrimientos menores (25 mm) las vigas experimentan una reducción mayor en la capacidad de carga (70%), asociada con una temperatura promedio de 573 °C, mientras que las vigas con mayor recubrimiento (45 mm) se calentaron a una temperatura máxima promedio de 493 °C, con una disminución promedio en la capacidad de carga del 48%.

Para evaluar el comportamiento a la fatiga de vigas de hormigón armado PRF expuestas a elevadas temperaturas Zhao, et al. [43], llevaron a cabo una investigación empleando barras de PRFV y PRFC. El fuego fue controlado mediante la curva estándar ISO 834. Los resultados mostraron que hasta los 400 °C (tiempo de exposición de 2 h) la resistencia de ambas vigas ante cargas cíclicas se ve ligeramente afectada, aunque aquella armada con PRFV experimenta una mayor reducción (0,12 Pu) que la viga reforzada con PRFC (0,10 Pu). Sin embargo, la capacidad de carga de ambas vigas se perdió a 600 °C. Se pone de manifiesto que el incremento de temperatura trae consigo un aumento del ancho de grietas y la flecha en las vigas.

Prokeš, et al. [44], también evaluaron la capacidad de carga de vigas de hormigón armado con PRF después de la exposición a temperaturas elevadas. Los resultados se compararon con una muestra de hormigón armado con acero. Para el ensayo emplearon barras de refuerzo de PRF de vidrio (PRFV) y PRF de carbono (PRFC) producidas comercialmente con tratamientos superficiales de revestimiento de arena. Los resultados mostraron que después de 2h de exposición al fuego las vigas reforzadas con barras de PRFV sufren una mayor degradación de su resistencia (46%) con respecto a las reforzadas con barras de PRFC (66%) y a las de acero (90%). De igual forma, concluyeron que el tiempo de resistencia al fuego de las vigas reforzadas con PRF puede alcanzar al menos los 60 minutos.

Hassan, et al. [45], realizaron un estudio experimental y teórico para evaluar la resistencia al fuego de vigas de hormigón armado con refuerzo híbrido de polímeros reforzados con fibras de basalto PRFB y acero, procurando establecer criterios en cuanto a las relaciones entre las cuantías de ambos refuerzos. Consideraron para las barras de PRFB valores de cuantías del 100%, 67% y 33% del área total del refuerzo en tracción. Los resultados experimentales se compararon con cálculos teóricos según el código ACI y con resultados numéricos obtenidos mediante el programa de elementos finitos ANSYS. Los resultados mostraron que cuanto mayor es la relación de barras de PRFB con respecto al número total de barras, mayor es el agrietamiento y la correspondiente deflexión, debido a su menor módulo de elasticidad. Las vigas con un alto porcentaje de barras de BFRP indicaron alto grado de ductilidad; la viga de acero a 25 °C y 500 °C registró una ductilidad que fue menor en 52,27% y 50,50% respectivamente en comparación con la viga reforzada solo con PRFV, lo cual indica una mayor eficiencia de estas barras cuando son sometidas a fuego. También se concluye que al emplear una combinación híbrida de

ambos refuerzos en la misma viga se observa una mejora en el patrón de grietas y en la rigidez del elemento.

3.2 Métodos numéricos para el estudio del comportamiento de elementos de hormigón armado con refuerzo de PRF

Para simular el comportamiento térmico y mecánico de elementos de hormigón armado expuestos al fuego se han presentado varios modelos numéricos. En ellos, el análisis de transferencia de calor se realiza principalmente utilizando el método de elementos finitos. El enfoque de los estudios existentes se ha centrado en la predicción confiable de la degradación de la resistencia y el incremento en la deformación.

En el año 2010, Lin and Zhang [46] desarrollaron un elemento viga unidimensional simple compuesto por capas de dos nodos, para modelar con precisión el comportamiento estructural de vigas de hormigón armado con polímero reforzado con fibra o acero, bajo la combinación de una carga mecánica y carga térmica en condiciones de fuego. Se realiza un análisis de elementos finitos no lineales basado en la teoría de transferencia de calor para determinar la distribución de temperatura a través de la sección transversal de la viga. El elemento propuesto y los procedimientos de análisis de elementos finitos no lineales para vigas de hormigón armado bajo la combinación de la carga mecánica y la carga de fuego se validan con los datos experimentales disponibles y los resultados de análisis numéricos. Una vez validado, el modelo de elementos finitos se usa para investigar los efectos de una serie de parámetros, como el espesor del recubrimiento del hormigón (10 mm, 20 mm y 40 mm), el tipo de refuerzos que incluyen PRFV, PRFC y PRFA, y la relación de la carga aplicada con respecto a la carga última, sobre el comportamiento estructural de las vigas de hormigón armado con PRF en condiciones de incendio. Como resultado de la modelación se concluye que el incremento del recubrimiento trae consigo un incremento de la resistencia al fuego del elemento y que el tipo de fibra tiene una influencia significativa, siendo las barras de PRFC las que tienen menores deformaciones, tanto a temperatura ambiente como a elevadas temperaturas.

Yu and Kódur [47, 48], desarrollaron un modelo numérico para evaluar la respuesta al fuego de una viga de hormigón reforzada con barras de PRFV y PRFC. El modelo se basa en el enfoque de elementos finitos macroscópicos y tiene en cuenta las propiedades a altas temperaturas de los materiales constitutivos, las condiciones de carga y restricciones, así como la degradación de la adherencia en la interfaz PRF- hormigón. La validez del modelo se establece comparando las predicciones del mismo con los datos de los ensayos de fuego realizados por Abbasi and Hogg [37] y Rafi [39]. El modelo fue realizado inicialmente para vigas reforzadas con acero y extendido al refuerzo de PRFC y PRFV. Los resultados del estudio numérico indican que la viga de hormigón convencional con refuerzo de acero logra una mayor resistencia al fuego que la viga con barras de refuerzo de PRF. Además, la viga de hormigón reforzada con barras de refuerzo de PRFC alcanza una mayor resistencia al fuego (falla a los 85 min) que la armada con barras de refuerzo de PRFV (falla a los 70 min). También se muestra que un recubrimiento adecuado (en el orden de los 70 mm) puede aumentar significativamente la resistencia al fuego de vigas de hormigón con refuerzo de PRF.

Para estudiar el comportamiento de una viga reforzada con PRF, Nasreen [31], desarrolló un modelo en el software ANSYS. El análisis se realiza para vigas reforzadas con acero (viga de control), barras de PRFV y PRFC y para diámetros de barra disponibles comercialmente. El estudio tiene como objetivo obtener el recubrimiento mínimo requerido por las barras de refuerzo de PRF para resistir hasta el límite de resistencia al fuego, con una deformación controlada. El estudio analítico se realiza en base a un estudio experimental realizado por Abbasi y Hogg (2005). El modelo desarrollado se sometió a dos etapas, análisis estructural térmico y estático transitorio. La temperatura es aplicada según la curva de fuego ISO 834. Los resultados arrojan que la temperatura crítica obtenida para la barra de PRFV está entre 330 y 350°C y para la barra de PRFC la temperatura crítica se obtiene entre 600-650°C. El recubrimiento mínimo requerido para las barras de PRFV para resistir el fuego es de 60 mm, y para el refuerzo de PRFC se requieren 40mm. También se demuestra que con el aumento del recubrimiento, la deformación de la viga disminuye.

En el 2018, Kodur and Bhatt [49] desarrollaron un modelo numérico para evaluar el desempeño de losas de hormigón armado reforzado con barras de polímero reforzado con fibra (PRF) en condiciones de incendio. El modelo numérico utiliza un enfoque macroscópico basado en elementos finitos para investigar la respuesta termomecánica de losas desde la etapa elástica lineal hasta el colapso en condiciones de incendio. El modelo tiene en cuenta las propiedades dependientes de la temperatura de los materiales, así como la degradación inducida por la temperatura de la adherencia entre el hormigón y el PRF. El modelo se valida comparando la respuesta prevista de losas reforzadas con FRP con las temperaturas y las deflexiones medidas en las pruebas de fuego realizadas por Blontrock, et al. [50]. Además, se comprobó que la degradación de la adherencia inducida

por la temperatura influye significativamente en el comportamiento frente al fuego de una losa de hormigón reforzada con PRF y de no considerarse en los modelos puede llevar a una estimación no conservadora de la resistencia al fuego.

Hajiloo and Green [51] llevaron a cabo la modelación de losas de hormigón armado (con barras de PRFV mediante el método de elementos finitos (MEF). El modelo estuvo validado contra dos ensayos de fuego a gran escala de losas de hormigón armadas con PRFV y acero [41], y fue empleado como parámetro de control la deformación en el centro de la viga. El modelo predice con éxito la distribución de la temperatura dentro de los elementos, así como las rápidas deflexiones térmicas debido al gradiente de temperatura dentro de la profundidad de las losas. Los resultados mostraron que la tensión en las barras de refuerzo de PRFV aumenta rápidamente al comienzo del fuego (primeros 30 minutos) y se estabiliza después de eso.

4. Métodos de diseño de elementos de hormigón armado con PRF en situación de incendio

El diseño en situación de incendio de elementos de hormigón armado con PRF deberá realizarse teniendo en cuenta los factores de ponderación de las cargas y disminución de la resistencia de los materiales, tal como establecen las normas para el diseño de elementos de hormigón armado con acero convencional [52], así como los criterios de servicio de ancho de grieta y deformación utilizados durante el proceso de diseño a temperatura ambiente de los elementos de hormigón armado con barras de PRF [26]. Las diferencias en la filosofía de diseño entre guías y códigos para hormigón reforzado con acero (que generalmente está controlado por la resistencia), en comparación con las del hormigón reforzado con PRF (que a menudo está controlado por criterios de servicio), conllevan a que cuando se somete a un caso de incendio, la capacidad de flexión de los elementos reforzados con PRF puede tener una reserva de resistencia mucho mayor que los reforzados con acero [22].

Un diseño racional de los elementos de hormigón armado con PRF para la seguridad contra incendios debe realizarse con una comprensión clara de los criterios apropiados de resistencia estructural al fuego, aplicables a los edificios en los que se proponen. El diseñador debe tener en cuenta aspectos como la reducción en la resistencia y la rigidez de las barras, dadas por el tipo de matriz y tipo de fibra que las componen; las reducciones inducidas por la temperatura en la adherencia entre las barras de PRF y el hormigón, provocadas fundamentalmente por el reblandecimiento y degradación de la matriz polimérica (ACI 440- 1R 2015) y el desprendimiento del hormigón circundante a las barras producto de la diferencia en el coeficiente de expansión transversal (CET) entre el PRF y el hormigón; y el incremento en los valores de recubrimiento para garantizar los requerimientos de tiempo de resistencia al fuego de las edificaciones.

En la actualidad no existen normas o regulaciones que especifiquen procedimientos para el diseño de los elementos estructurales de hormigón armado con barras de PRF en situación de incendio [53]. Aun cuando se reconoce que la filosofía es similar a la de aquellos que emplean armadura convencional de acero [26, 54], son pocos los trabajos dirigidos a establecer pautas o guías para el diseño con este tipo de refuerzo a elevadas temperaturas.

Saafi [26], brinda metodologías para el cálculo de la capacidad resistente a flexión y cortante de vigas de hormigón armado con PRF, las cuales no están respaldadas por ninguna investigación experimental. Para el hormigón considera una disminución tanto en la sección resistente como en la resistencia a compresión (f_{cT}). El ancho de la sección reducida (b_r) 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 del PRF se calcula a partir de la temperatura en cada barra que conforma el refuerzo longitudinal y la temperatura promedio para el estribo.

Nigro, et al. [54], proponen una guía para el cálculo solamente del momento flector resistente de losas y vigas de hormigón armado con PRF, tomando como referencia los métodos simplificados propuestos en el EN-1991-1-2 [52] para secciones transversales armadas con acero. Este se fundamentan en el equilibrio de fuerzas en la sección y la evaluación de la reducción de las resistencias iniciales del hormigón y el refuerzo debido a la exposición al fuego, a partir de considerar la sección reducida ("Método de la isoterma 500" [52]) y la temperatura en cada barra.

Ambos autores concuerdan en que la resistencia 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 resistencia de los materiales y/o en el área efectiva de la sección transversal por efecto de las altas temperaturas. El trabajo desarrollado por Díaz, et al. [55] demuestra que para evaluar la resistencia a cortante en vigas de

hormigón armado con PRF en situación de incendio, la propuesta de Nigro, et al. [54], con base a lo que establece el EN-1991-1-2 [52], resulta ser la más conservadora, recomendándose el empleo de la misma.

5. Conclusiones

El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas permite arribar a las siguientes conclusiones:

1. Del estudio de los polímeros reforzados con fibras:

El impacto mundial que han generado los materiales compuestos en la ingeniería civil está dado principalmente por las grandes ventajas que presenta su empleo como material novedoso en la construcción como: la alta resistencia a tracción, no corrosión, resistencia a la acción de sustancias químicas y a la fatiga, además de su baja densidad, conductividad térmica y costos.

Entre las principales limitaciones que reducen su aplicación en este campo están su escasa o nula ductilidad, su menor módulo de elasticidad en comparación al acero, baja resistencia a compresión y a cortante y su menor resistencia al fuego dada fundamentalmente por la resina que lo compone.

2. Del estudio del comportamiento de las barras de PRF y de los elementos de hormigón armado en situación de incendio

Los estudios experimentales realizados para evaluar la degradación de las propiedades mecánicas de las barras de PRF demuestran que tanto la resistencia como la rigidez de estas sufren una disminución significativa cuando la temperatura en la barra alcanza valores superiores a la temperatura de transición vítrea (T_g), la cual oscila entre los 93 a 120°C para las resinas utilizadas en la mayoría de las barras de PRF que se emplean como refuerzo del hormigón. En el caso de las fibras, estas son capaces de soportar temperaturas entre 600 y 1000 °C, en función del tipo de fibra empleado.

La “novedad” del material, unido al elevado costo y lo complejo de la realización de ensayos físicos a elevadas temperaturas de elementos de hormigón armado con barras de PRF, han limitado las investigaciones para predecir el comportamiento térmico y estructural de dichos elementos, lo que ha conducido a emplear procedimientos de modelación numérica tanto bidimensional como tridimensional para complementar la información experimental disponible.

Las investigaciones realizadas hasta la fecha reconocen la influencia de diversos factores en la respuesta del material a elevadas temperaturas, tales como la geometría de la sección, las cuantías y tipo de refuerzo y el recubrimiento del hormigón, identificándose este último como el parámetro de mayor influencia a considerar en el diseño, en función de las exigencias de resistencia al fuego.

3. Del diseño de elementos de hormigón armado con PRF en situación de incendio.

Los modelos analíticos para el diseño de elementos estructurales de hormigón armado con PRF están bien documentados en el contexto normativo, sin embargo, no existen en la actualidad normas o regulaciones que especifiquen procedimientos para el diseño de estos elementos en situación de incendio.

Los trabajos desarrollados por Saafi [26] y Nigro [54] constituyen las primeras aproximaciones al diseño de elementos de hormigón armado con barras de PRF en situación de incendio. Ambos coinciden en que la capacidad de estos elementos expuestos al fuego puede ser evaluada bajo la misma filosofía que se emplea cuando se refuerza con acero, partiendo de las metodologías existentes para el diseño a temperatura ambiente, y considerándose la reducción en la fuerza resistente de los materiales y/o en el área efectiva de la sección transversal por efecto de las altas temperaturas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI-440.1R, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforcing with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars," vol. 1, ed. Farmington Hills. EUA.: American Concrete Institute, 2015, p. 88.
- [2] M. Bazli, A. Jafari, H. Ashrafi, X.-L. Zhao, Y. Bai, and R. S. Raman, "Effects of UV radiation, moisture and elevated temperature on mechanical properties of GFRP pultruded profiles," *Construction and Building Materials*, vol. 231, p. 117137, 2020.

- [3] H.-y. Zhang, X. Hao, and W. Fan, "Experimental study on high temperature properties of carbon fiber sheets strengthened concrete cylinders using geopolymer as adhesive," *Procedia Engineering*, vol. 135, pp. 47-55, 2016.
- [4] M. Shekarchi, E. M. Farahani, M. Yekrangnia, and T. Ozbakkaloglu, "Mechanical strength of CFRP and GFRP composites filled with APP fire retardant powder exposed to elevated temperature," *Fire Safety Journal*, vol. 115, p. 40, 2020.
- [5] A. Younis, U. Ebead, A. Nanni, and P. Suraneni, "STRENGTH, SHRINKAGE, AND PERMEABILITY PERFORMANCE OF SEAWATER CONCRETE," *Structural Engineering and Construction Management*, p. 7, 2019.
- [6] C. Bywalski, M. Drzazga, M. Kaźmierowski, and M. Kamiński, "Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with a New Type of Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcement: Experimental Study," *Materials*, vol. 13, p. 1159, 2020.
- [7] H. Ashrafi, M. Bazli, E. P. Najafabadi, and A. V. Oskouei, "The effect of mechanical and thermal properties of FRP bars on their tensile performance under elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 1001-1010, 2017.
- [8] Z. Lu, G. Xian, and H. Li, "Effects of elevated temperatures on the mechanical properties of basalt fibers and BFRP plates," *Construction and Building materials*, vol. 127, pp. 1029-1036, 2016.
- [9] A. Bilotta, A. Compagnone, L. Esposito, and E. Nigro, "Structural behaviour of FRP reinforced concrete slabs in fire," *Engineering Structures*, vol. 221, p. 111058, 2020.
- [10] T. B. Carlos, J. P. C. Rodrigues, R. C. de Lima, and D. Dhima, "Experimental analysis on flexural behaviour of RC beams strengthened with CFRP laminates and under fire conditions," *Composite Structures*, vol. 189, pp. 516-528, 2018.
- [11] H. Hajiloo, M. F. Green, and J. Gales, "Mechanical properties of GFRP reinforcing bars at high temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 142-154, 2018.
- [12] H. R. Wainshtok, J. A. Hernández, and I. Díaz. *Calidad y durabilidad de las Construcciones. El uso de los PRF como refuerzo del hormigón armado y el ferrocemento*. Valencia, España, 2017.
- [13] E. P. Najafabadi, M. H. Khaneghahi, H. A. Amiri, H. E. Estekanchi, and T. Ozbakkaloglu, "Experimental investigation and probabilistic models for residual mechanical properties of GFRP pultruded profiles exposed to elevated temperatures," *Composite Structures*, vol. 211, pp. 610-629, 2019.
- [14] P. S. C. Vieira, F. S. de Souza, D. C. T. Cardoso, J. D. Vieira, and F. de Andrade Silva, "Influence of moderate/high temperatures on the residual flexural behavior of pultruded GFRP," *Composites Part B: Engineering*, vol. 200, p. 108335, 2020.
- [15] I. S. K. Wijayawardane, H. Mutsuyoshi, H. Nguyen, and A. Manalo, "Flexural behaviour of glass fibre-reinforced polymer and ultra-high-strength fibre-reinforced concrete composite beams subjected to elevated temperature," *Advances in Structural Engineering*, vol. 20, pp. 1357-1374, 2017.
- [16] A. Nanni, A. de Luca, and H. Jawaheri Zadeh, *Reinforced Concrete with FRP Bars*. Estados Unidos, 2014.
- [17] ISIS Canada Corporation, *Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers*, 2 ed. vol. 3 Canadá: ISIS Canada Corporation, 2007.
- [18] CAN/CSA-S806-12, "Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers," vol. S806-12, ed. Mississauga, Ontario. Canadá: Canadian Standards Association, 2017, p. 198.
- [19] ESCC, "Egyptian code of practice for the use of fiber reinforced polymer (FRP) in the construction fields," in *The use of fiber reinforced polymer (FRP) in the construction fields* vol. Code No. ECP 208-2005 ed. Egypt, 2005, p. 166.
- [20] R. J. Hamad, M. M. Johari, and R. H. Haddad, "Mechanical properties and bond characteristics of different fiber reinforced polymer rebars at elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 142, pp. 521-535, 2017.
- [21] M. Bazli, "Mechanical and microstructural properties of different FRP composites under various environmental conditions," Ph. D. Thesis, Monash University, Melbourne, VI, Australia, 2020.
- [22] V. Kodur, L. Bisby, and M. Green, "Preliminary guidance for the design of FRP-strengthened concrete members exposed to fire," *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 17, pp. 5-26, 2007.
- [23] Y. Yang, Y. Jiang, H. Liang, X. Yin, and Y. Huang, "Study on tensile properties of CFRP plates under elevated temperature exposure," *Materials*, vol. 12, p. 1995, 2019.
- [24] G. A. Kashwani and A. K. Al-Tamimi, "Evaluation of FRP bars performance under high temperature," *Physics Procedia*, vol. 55, p. 5, 2014.

- [25] Y. C. Wang, P. M. H. Wong, and V. K. R. Kodur, "Mechanical properties of fibre reinforced polymer reinforcing bars at elevated temperatures.," p. 11, 2003.
- [26] M. Saafi, "Effect of fire on FRP reinforced concrete members," www.elsevier.com/locate/compstruct, vol. 58, p. 10, 2002.
- [27] L. A. Bisby, "Fire behaviour of fibre-reinforced polymer (FRP) reinforced or confined concrete," Doctor, Department of Civil Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada 2003.
- [28] D. T. Ali Nadjai, Faris Ali, "Fire performance of concrete beams reinforced with FRP bars," FireSERT vol. 27, pp. 401-410, 1/1/2005 2005.
- [29] Y. C. Wang, P. M. H. Wong, and V. K. R. Kodur, "An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures," www.elsevier.com/locate/compstruct, vol. 80, p. 10, 2007.
- [30] K. Devendra and T. Rangaswamy, "Thermal conductivity and thermal expansion coefficient of GFRP composite laminates with fillers.," p. 6, 2013.
- [31] M. K. Nasreen, "Numerical Study of FRP Reinforced Concrete under Fire Exposure," International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, vol. Vol. 5, p. 10, 2016.
- [32] A. Z. Hizia Bellakejal, Radhouane Masmoudi, Mohamed Bouhicha, "Behavior of FRP Bars-Reinforced Concrete Slabs under Temperature and Sustained Load Effects.," Polymers, vol. 6, p. 17, 2014.
- [33] U. Berardi and N. Dembsey, "Thermal and Fire Characteristics of FRP Composites for Architectural Applications," p. 14, 2015.
- [34] Q. Xing, J. Liao, Z. Chen, and W. Huang, "Shear behaviour of fire-damaged reinforced-concrete beams," Magazine of Concrete Research, vol. 72, pp. 357-364, 2020.
- [35] Y. Larrua, "Comportamiento termo-estructural y diseño de vigas compuestas de acero y hormigón en situación de incendio.," Tesis de Doctorado, Departamento de Construcciones, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, 2016.
- [36] M. Sakashita, "Deflection of continuous fiber reinforced concrete beams subjected to loaded heating.," in Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, 1997, pp. 51-58.
- [37] A. Abbasi and P. J. Hogg, "Fire testing of concrete beams with fibre reinforced plastic rebar.," Composite Structures, vol. 37, p. 9, 2005.
- [38] L. A. Bisby, M. F. Green, and V. K. Kodur, "Response to fire of concrete structures that incorporate FRP," Progress in Structural Engineering and Materials, vol. 7, pp. 136-149, 2005.
- [39] M. M. Rafi, A. Nadjai, and F. Ali, "Fire resistance of carbon FRP reinforced-concrete beams," Magazine of Concrete Research vol. 59, p. 11, 2007.
- [40] F. M. Özkal, M. Polat, M. Yağan, and M. O. Öztürk, "Mechanical properties and bond strength degradation of GFRP and steel rebars at elevated temperatures," Construction and Building Materials, vol. 184, pp. 45-57, 2018.
- [41] H. Hajiloo, M. F. Green, M. Noël, N. Bénichou, and M. Sultan, "Fire tests on full-scale FRP reinforced concrete slabs," Composite Structures, vol. 179, pp. 705-719, 2017.
- [42] I. R. Petr D., Ondřej K., "Experimental Study of Concrete Beams Reinforced with GFRP Rebars Exposed to High Temperatures," Key Engineering Materials, vol. 808, pp. 177-182, 2019.
- [43] J. Zhao, G. Li, Z. Wang, and X.-L. Zhao, "Fatigue behavior of concrete beams reinforced with glass-and carbon-fiber reinforced polymer (GFRP/CFRP) bars after exposure to elevated temperatures," Composite Structures, vol. 229, p. 111427, 2019.
- [44] J. Prokeš, I. Rozsypalová, F. Girgle, P. Daněk, and P. Štěpánek, "Effects of elevated temperature on the behaviour of concrete beams reinforced with fiber reinforced polymers," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, p. 012008.
- [45] A. Hassan, F. Khairallah, H. Elsayed, A. Salman, and H. Mamdouh, "Behaviour of concrete beams reinforced using basalt and steel bars under fire exposure," Engineering Structures, vol. 238, p. 112251, 2021.
- [46] X. Lin and Y. X. Zhang, "Nonlinear finite element analyses of steel/FRP-reinforced concrete beams in fire conditions," Composite Structures, vol. 97, pp. 277-285, 2010.
- [47] B. Yu and V. Kódur, "Factors governing the fire response of concrete beams reinforced with FRP rebars," Composite Structures, vol. 100, pp. 257-269, 2013.
- [48] B. Yu and V. Kódur, "Evaluating fire response of concrete beam reinforced with FRP rebars.," p. 9, 2012.
- [49] V. Kodur and P. Bhatt, "A numerical approach for modeling response of fiber reinforced polymer strengthened concrete slabs exposed to fire," Composite Structures, vol. 187, pp. 226-240, 2018.

- [50] H. Blontrock, L. Taerwe, and P. Vandeveld, "Fire testing of concrete slabs strengthened with fibre composite laminates," in FRPRCS-5: Fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures Volume 1: Proceedings of the fifth international conference on fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures, Cambridge, UK, 16–18 July 2001, 2001, pp. 547-556.
- [51] H. Hajiloo and M. F. Green, "GFRP reinforced concrete slabs in fire: Finite element modelling," *Engineering Structures*, vol. 183, pp. 1109-1120, 2019.
- [52] EN-1991-1-2, "Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions Actions on structures exposed to fire," ed, 2002.
- [53] M. Diab, "Shear capacity of reinforced concrete beams at elevated temperatures," Master of Engineering Science, Civil and Environmental Engineering, University of Western Ontario, Western Ontario, Canadá, 2014.
- [54] E. Nigro, G. Cefarelli, A. Bilotta, G. Manfredi, and E. Cosenza, "Guidelines for flexural resistance of FRP reinforced concrete slabs and beams in fire," *Composites: Part B*, vol. 58, p. 10, 2014.
- [55] I. Díaz, R. Larrúa, H. Wainshtok, and M. Mackchaser, "Simplified methods to determine shear strength in reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymers exposed to fire," *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 36, pp. 97-106, 2021.
- 