



EFFECTS OF FIRE ON THE STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL ELEMENTS: A LITERARY REVIEW

EFFECTOS DEL FUEGO SOBRE LA RESISTENCIA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN ARMADO: UNA REVISION DE LITERATURA

Estefany Ramos Cisneros¹; Luis Marquina-Irigoin¹; Sócrates Muñoz, Pérez^{1*}; Kevin Jiménez-Carranza¹; Ángel Quispe-Rinza¹ & Lucas Hurtado-Pérez¹

¹ Universidad Señor de Sipán, Lambayeque, Perú.
rcisnerosstefa@crece.uss.edu.pe/mirigoirluisant@crece.uss.edu.pe/msocrates@crece.uss.edu.pe/jcarranzakevin@crece.uss.edu.pe/qrinzaangel@crece.uss.edu.pe/hperezlucasarno@crece.uss.edu.pe/

* Corresponding Author: msocrates@crece.uss.edu.pe

Estefany Ramos Cisneros: <https://orcid.org/0000-0003-3292-5596>
Luis Marquina Irigoin: <https://orcid.org/0000-0002-4162-7980>
Sócrates Muñoz, Pérez: <https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>
Kevin Jiménez Carranza: <https://orcid.org/0000-0001-5038-2041>
Ángel Quispe Rinza: <https://orcid.org/0000-0002-2300-8852>
Lucas Hurtado Pérez: <https://orcid.org/0000-0001-5798-2402>

ABSTRACT

The objective of this document is to carry out a systematic review of the effects that fire has on the mechanical and thermal properties of reinforced concrete structures. The fire in the structure causes the temperature of the concrete surface to increase, thus reducing its resistance to compression, bending and elastic modulus. Although concrete has a poorer conductor than steel, the constant high temperature on the surface causes gradual heating in its inner layer. As a building material, concrete is widely used due to its high resistance to fire, it is essential to withstand one of the most severe disasters that a structure can withstand in its life. The objective of this document is to carry out a systematic review of the effects that fire has on the mechanical and thermal properties of reinforced concrete structures. A systematic review was applied to 50 articles published in a database indexed between the years 2011

and 2021 were reviewed, distributed as follows: 28 in Scopus, nine in Web of Science, eight in Scielo, three in ScienceDirect and two in EBSCO, referring to concrete resistant to fire, high temperatures, mechanical properties and thermal conductivity. In order to understand the impact that fire has on the resistance of reinforced concrete structural elements, the results of studies carried out in the field were presented. It is concluded that the main effects of fire on reinforced concrete were: 1) decrease in the adhesion between concrete and steel, 2) concrete breakage and, 3) reduction of concrete and steel resistance.

Keywords: Effect of fire on reinforced concrete – mechanical properties of reinforced concrete – thermal conductivity

RESUMEN

El presente documento tiene como objetivo realizar una revisión sistemática de los efectos que tiene el fuego en las propiedades mecánicas y térmicas de las estructuras de hormigón armado. El fuego en la estructura hace que aumente la temperatura de la superficie del hormigón, reduciendo así su resistencia a la compresión, flexión y el módulo elástico. Aunque el hormigón tiene un conductor más pobre que el acero, la alta temperatura constante en la superficie provoca el calentamiento gradual en su capa interior. Como material de construcción, el hormigón se usa ampliamente debido a su alta resistencia al fuego, es esencial para resistir uno de los desastres más severos que una estructura puede soportar en su vida. Se aplicó una revisión sistemática de 50 artículos publicados en base de datos indexadas entre los años 2011 y 2021, distribuidos de la siguiente manera: 28 en Scopus, nueve en Web of Science, ocho en Scielo, tres en ScienceDirect y dos en EBSCO, referentes al hormigón resistente al fuego, temperaturas altas, propiedades mecánicas y conductividad térmica. Para poder comprender el impacto que tiene el fuego en la resistencia de elementos estructurales de hormigón armado se presentaron los resultados de estudios elaborados en el ámbito. Se concluye que los principales efectos del fuego sobre el hormigón armado fueron: 1) disminución en la adherencia entre el hormigón y el acero, 2) rotura del hormigón, y 3) reducción de la resistencia del hormigón y el acero.

Palabras claves: conductividad térmica – efecto del fuego en el hormigón armado – propiedades mecánicas del hormigón armado

INTRODUCCIÓN

El hormigón es un excelente material de construcción con buena durabilidad y actúa como una capa protectora eficaz para proteger el refuerzo de entorno dañino; está influenciado por el tipo de cemento, el tipo de agregado, la naturaleza de los aditivos presentes y contenido de agua (Anand *et al.*, 2016).

El fuego es uno de los riesgos más comunes que puede soportar una estructura de hormigón armado durante su vida útil. Hay dos aspectos diferentes de la seguridad estructural contra incendios. Primero, el edificio debe resistir el fuego dentro de la duración especificada; el segundo aspecto es reutilizar el edificio después de haber estado expuesto al fuego (Lakhani & Ozbolt, 2019; Abdul *et al.*, 2019).

El hormigón es un material que resiste al fuego, pero cuando está expuesto a altas temperaturas las propiedades químicas, físicas y mecánicas del hormigón cambian. El fuego es uno de los mayores peligros, reduce la estabilidad y la durabilidad de la estructura de hormigón. La estructura de hormigón armado con acero muestra un mejor comportamiento frente al fuego que la estructura de acero puro, esto se debe a que el hormigón protege el acero interno (Albuquerque & Silva, 2013; Han *et al.*, 2015).

Es fundamental conocer las propiedades de los diversos materiales empleados en la construcción a altas temperaturas, ya que pueden provocar el colapso del edificio si no se controlan adecuadamente. Utilizando

varios tipos de combustibles, incluidos arbustos secos, gasolina, combustibles líquidos, etc., el fuego puede ser diseñado para destruir o causar daños y representa uno de los peligros más probables que puede experimentar una estructura durante su ciclo de vida (Quiel *et al.*, 2020).

Dado que las unidades horizontales (vigas y losas) cercanas al techo son más susceptibles a los efectos de convección y llamas que las unidades verticales, las unidades horizontales pueden verse atenuadas por la resistencia inducida por la temperatura durante todo el incendio (Agrawal & Kodur, 2020).

El comportamiento del hormigón armado a altas temperaturas es diferente al de las condiciones ambientales, lo que se debe principalmente a la disminución gradual de la resistencia del material cuando incrementa la temperatura. Además, al aumentar la presión del poro y la tensión térmica desigual provocan desconchado del hormigón (Kumar *et al.*, 2013; Kumar & Agarwal, 2020).

El fuego afecta gran parte de la estructura reforzada con acero. Los más importantes son la duración de la carga térmica, el contenido de humedad del hormigón, el tipo de árido y la composición mineral. Los efectos del fuego en cada parte de las estructuras reforzadas con acero que soportan cargas son sujeto a una gran cantidad de influencias (Rozsypalova *et al.*, 2017; Tutikian *et al.*, 2020).

Cuando la estructura se expone al fuego, la temperatura aumentará, sus características de los materiales

cambiarán tanto mecánicas y térmicas que componen la estructura. Estos cambios conducirán a la pérdida de resistencia, adherencia entre el cemento y el agregado, así como al agrietamiento y pelado, lo que puede ocasionar un colapso parcial o total, por lo que debe ser considerado en la etapa de diseño (Gil *et al.*, 2018).

En las estructuras de hormigón armado, sus elementos se dañan cuando se exponen a altas temperaturas y sufren cambios físicos y químicos. Las propiedades más influyentes en barras de refuerzo son: la resistencia a la compresión, tracción y el módulo de elasticidad (Gernay, 2019).

Las altas temperaturas dañan al hormigón, el mecanismo de sujetar por fricción se debilita, por lo tanto, se reduce la resistencia al desprendimiento de la barra de acero, dado que la resistencia a la tracción y compresión son parámetros muy importantes para analizar el rendimiento de la junta, y dado que la resistencia a la tracción afecta la fricción, este mecanismo se debilitará cuando se reduzca la resistencia (Jerônimo *et al.*, 2020).

El hormigón actúa como barrera térmica, reduciendo el flujo de calor al acero, en comparación con otros materiales, el hormigón tiene mejores propiedades térmicas, como baja conductividad térmica y alto calor específico, lo que puede reducir la propagación del calor en la sección transversal. Debido al calentamiento, ambos materiales tienden a perder rigidez y resistencia mecánica, que es el mecanismo por el cual la microestructura

del hormigón se degrada en condiciones de incendio (Simões & Santos, 2020).

La ingeniería estructural contra incendios recomienda tener en cuenta el impacto de degeneración del material a elevadas temperaturas. En caso de incendio incontrolado durante la vida del edificio, las pruebas de resistencia realizadas permiten obtener valores específicos, los cuales deben ser considerados al momento de diseñar elementos estructurales de hormigón armado (Ruvalcaba-Ayala & Covarrubias-Navarro, 2017).

La estructura puede ser de cualquier material y el calentamiento se realiza mediante una curva de temperatura-tiempo, mientras las tabulaciones no es la mejor solución técnica para resolver los requisitos específicos inherentes a la posible estructura y sistema de protección (Pierin *et al.*, 2015).

En estructuras expuestas al fuego, es necesario determinar la temperatura y la resistencia a la tracción (Heidarpour *et al.*, 2014; Ehrenbring *et al.*, 2017). Determinar las propiedades mecánicas del refuerzo longitudinal, puede analizar en detalle el impacto en el sistema estructural del edificio (Maluk *et al.*, 2017). Cuanto menor sea el nivel del piso afectado por el incendio, mayor será el desplazamiento horizontal del edificio. A medida que más y más pisos se ven afectados simultáneamente por el fuego, el estado de la estructura empeora, lo que refuerza la importancia de la separación vertical (Naccache *et al.*, 2019).

Desde los primeros estudios sobre

hormigón expuesto al calor en el pasado siglo, las estructuras de hormigón armado mostraron un buen comportamiento en el fuego gracias a algunas características típicas de cemento materiales como la incombustibilidad y la baja difusividad térmica (Bamonte & Lo Monte, 2015). Además de ayudar a proteger la barra de acero, la base de cemento también ayuda en la resistencia y durabilidad del sistema estructural (Wang *et al.*, 2018).

Diseñar la acción con fuego es un punto importante en la ingeniería, que consiste en comprender como se comportan las estructuras y el grado de seguridad a ser aplicado bajo la acción del usuario, primero en el usuario y luego en la propiedad (Ruvalcaba-Ayala & Covarrubias-Navarro, 2017). En el futuro, se centrarán en el desarrollo

de modelos para simular el comportamiento de estructuras de hormigón armado y combinar estos elementos con el análisis para proporcionar un marco para edificios en llamas (Caldas *et al.*, 2014).

MATERIAL Y MÉTODOS

Se buscaron 50 artículos en base de datos indexadas y distribuidos de la siguiente manera: 28 en Scopus, nueve en Web of Science, ocho en Scielo, tres en ScienceDirect, dos en EBSCO, los cuales están entre los años 2011 y 2021. Se utilizaron las siguientes palabras clave para buscar artículos en español e inglés: hormigón resistente al fuego, temperaturas altas, propiedades mecánicas y conductividad térmica. Para obtener información más detallada observar la Tabla 1.

Tabla 1: Artículos distribuidos de acuerdo a la Base de Datos y año de Publicación.

Base de datos	Año de Publicación	
	2011-2015	2016-2021
Scielo	2	6
Web of Science	4	5
ScienceDirect	0	3
EBSCO	0	2
Scopus	5	23
Total	11	39

La búsqueda se realizó usando materias de temas y palabras clave en idioma inglés para definir el comportamiento del hormigón a altas temperaturas. La revisión de la literatura consideró las publicaciones

desde el año 2011 hasta el 10 de marzo del año 2021. Posteriormente, los resultados fueron compilados en una bitácora de búsqueda, creada en una hoja de cálculo para luego ser organizadas con Mendeley.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rasgos mecánicos del hormigón

Las características mecánicas del concreto se deterioran a altas temperaturas, debido a los cambios fotoquímicos en la mezcla de cemento y el agregado. Comparado con el hormigón a temperatura normal, el hormigón que soporta altas temperaturas a temprana edad tiene mayor resistencia a la tracción, pero la resistencia a la compresión obtenida en una edad posterior es baja. Calentar la muestra a una temperatura de 800 °C en 28 días puede mantener una relación de resistencia de 0,5 a 0,55 (Endait & Wagh, 2020).

La capacidad de carga de las muestras de hormigón armado disminuye a medida que la temperatura aumenta a 800 °C. En comparación con la carga a temperatura ambiente, después de calentar a temperaturas de 200 °C, 400 °C, 600 °C y 800 °C, el porcentaje de reducción de la carga restante es 24,5%, 38,8%, 63,3% y 83,7%, respectivamente. La razón de la disminución de la resistencia a la compresión a alta temperatura se puede atribuir a la falla de la unión entre el hormigón y el acero (Shariq *et al.*, 2020).

Se ha registrado más desconchado para las columnas con recubrimiento de hormigón más grueso y resistencia a la compresión del hormigón a 61,9 MPa, y aunque los hormigones de mayor resistencia tienen menos permeabilidad, esta característica se puede equilibrar con la mayor resistencia a la tracción de este tipo de hormigón (Gil *et al.*, 2018).

Dentro de los efectos de los métodos de enfriamiento sobre la resisten-

cia residual del hormigón, se encuentra que la pérdida de resistencia de las muestras enfriadas por agua es mayor que la de las muestras enfriadas por aire. Los resultados muestran que la fuerza cae rápidamente después de los 400 °C (Jafari & Akbari, 2020).

Cuando una estructura de hormigón armado sufre un incendio, su rendimiento mecánico y durabilidad se verán reducidas, en función de las características del material, la duración del incendio y la forma de extinguirlo. Las propiedades mecánicas que cambian durante la exposición a altas temperaturas son: resistencia a la compresión, tracción y el módulo de elasticidad (de Assis Oliveira *et al.*, 2019).

Debido a cambios en los parámetros físicos internos, las propiedades mecánicas del acero y el hormigón disminuirán a altas temperaturas. Por lo tanto, los componentes de hormigón armado dañados pueden no lograr el rendimiento esperado (Song *et al.*, 2019).

La relación agua-cemento, la resistencia a la compresión, el nivel de temperatura en el hormigón o el acero y el área de las barras de acero son algunos de los factores clave que afectan la pérdida de resistencia de las vigas de hormigón armado a altas temperaturas (Thanaraj *et al.*, 2020).

La resistencia del hormigón tiene una influencia importante en la respuesta tensión-deformación a temperatura ambiente y alta temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la deformación correspondiente a la tensión máxima, especial-

mente por encima de 500 °C (Krishna *et al.*, 2019).

En la mayoría de los casos, la disminución de la capacidad de carga se debe a la disminución de la resistencia de las barras de acero, especialmente en la etapa de diseño, cuando no consideraron explícitamente los efectos del fuego y no protegieron bien el hormigón. Una construcción integral de la estructura que resistirá el fuego debe realizarse teniendo en cuenta el espesor, profundidad del revestimiento del acero y resistencia a la compresión del hormigón, la temperatura y el tiempo al que estaría expuesto el hormigón.

Módulo de elasticidad

La temperatura afectará significativamente el valor del módulo. El módulo de elasticidad (E) de varios hormigones a temperatura ambiente varía en un amplio rango de $5,0 \times 10^3$ a 35×10^3 MPa, y depende principalmente de la relación agua-cemento en la mezcla, la vida útil del hormigón, el método de acabado y la cantidad y la naturaleza de los agregados (Krishna *et al.*, 2019). La temperatura bajará rápidamente al módulo elástico, la mezcla es una de las principales variables que afectan el módulo elástico, y la proporción de la disminución es independiente del tipo de agregado.

La influencia de los áridos sobre las características del hormigón

Los agregados adecuados para hormigón resistente al calor deben presentar un bajo coeficiente de expansión térmica y una deformación residual insignificante. También pue-

de ocurrir metamorfismo de minerales, como el cambio de cuarzo a una temperatura de 574 °C. Este cambio resultó en un aumento de volumen de aproximadamente 0,84%. Los agregados de carbonato (como piedra caliza y dolomita) son estables a temperaturas de aproximadamente 700 °C. La resistencia relativa a la compresión residual del hormigón que contiene agregado de silicio después de ser calentado a 750 °C, es ligeramente superior en un promedio del 0,25% cuando se utiliza un cemento adicionado con menor contenido de clinker de silicato y mayor cantidad de adición de cenizas volantes o escoria (Hager, 2013; Bodnárová *et al.*, 2013).

Se realizaron experimentos para estudiar la influencia de la relación a/c en estas propiedades, se encontró dicha relación y el tipo de agregado no tienen una influencia significativa sobre la reducción de peso. La relación a/c no afecta la resistencia relativa del hormigón, pero el prototipo de agregado utilizado posee el impacto significativo en la resistencia del hormigón (Ahmad *et al.*, 2014).

Como casi todos los materiales sólidos, los agregados se expandirán al aumentar la temperatura. Por lo tanto, la expansión térmica del agregado es una propiedad importante por el efecto de una temperatura más alta y la expansión térmica del agregado depende de su composición mineralógica.

Propiedades térmicas del hormigón

En la mayoría de los casos, en comparación con otros materiales, el hormigón tiene invariancia inherente

y baja conductividad térmica, por lo que tiene propiedades extraordinarias en términos de resistencia al fuego y puede usarse para fijar otros materiales básicos, como el acero. En un incendio, las propiedades mecánicas de un sólido cambian principalmente debido a la redistribución, distorsión y separación entre moléculas. Los resultados obtenidos de este estudio indican que la gradación del agregado, la proporción de mezcla y el método de enfriamiento se consideran buenos parámetros de interacción a considerar a la hora de prevenir los efectos adversos del fuego en la estructura (Onundi *et al.*, 2019).

Cuando la temperatura del concreto aumenta, las propiedades mecánicas disminuirán, lo que resultará en una disminución en la capacidad de carga de los elementos, la microestructura de la pasta de cemento y el agregado cambiará, y el estrés térmico provocará cambios de volumen (Allam *et al.*, 2013).

El estudio experimental sobre la conductividad térmica del hormigón demostró que la lechada de cemento es casi la mitad que la del hormigón. Cambia el volumen del agregado, la relación a/c , la edad de la muestra, la fracción de agregado fino, la mezcla y el contenido de humedad que determinan su influencia en la conductividad térmica (Buryk & Drobenko, 2016).

Las características incluyen conductividad térmica, calor específico, expansión térmica y pérdida de masa. El tipo de agregado tiene un impacto significativo en el calor y la conductividad térmica. Según los datos experi-

mentales, se proporciona una relación numérica dependiente de la temperatura para calcular las propiedades térmicas del hormigón (Jafari & Akbari, 2020).

Las propiedades térmicas del hormigón, como la conductividad térmica y el calor específico, no dependen en gran medida del grado del hormigón. Se encuentra que la cantidad de refuerzo de confinamiento afecta la capacidad de carga a temperaturas elevadas más significativamente que a temperatura ambiente (Kumar & Agarwal, 2020).

Los componentes de hormigón armado con un tiempo de curado prolongado tienden a no despegarse a altas temperaturas, porque la transferencia de calor en el hormigón se ve afectada principalmente por los materiales que componen sus componentes. Cuando se expone al fuego, la presencia de microfibras de polipropileno es beneficiosa para el hormigón (Manica *et al.*, 2013; Lubloy, 2020).

La resistencia del concreto liviano disminuye con el aumento de la temperatura de exposición y mantiene el 19,5% y el 51,7% de la concentración original después de la exposición a 800 °C. El uso de cenizas de fondo como agregado y la mezcla de cenizas volantes en el aglutinante puede mejorar la resistencia térmica. La adición de cenizas volantes tiene beneficios en la resistencia térmica del hormigón, y la proporción de reemplazo del 20% (peso) es excesiva e ineficaz en este estudio (Ahn *et al.*, 2016).

La temperatura tiende a aumentar con la característica principal del

hormigón porque dicha resistencia conducirá a una mayor conductividad térmica y densidad, permitiendo así la transferencia de calor (Ryu *et al.*, 2020).

En cuanto a la duración del fuego, la diferencia es aún mayor. A medida que aumenta la duración del fuego, la capacidad de carga restante y la frecuencia natural que reflejan la rigidez general de la losa de hormigón armado disminuirán, pero el desplazamiento y la disipación de energía aumentarán (Jin *et al.*, 2021).

Según la composición del cemento, áridos, aditivos, existen muchos tipos de hormigón. Esto significa cambios en las propiedades mecánicas y térmicas, y diferentes cambios de temperatura. El hormigón se comporta bien en caso de incendio, y la baja conductividad térmica ralentizarán el calentamiento de las secciones. Reemplazar el cemento con cenizas volantes es una alternativa diferente de adición para el diseño y realización de estructuras de concreto con el fin de mejorar sus propiedades. Las cenizas volantes deben usarse como sustituto en el rango del 10% con el fin de mejorar sus propiedades.

Efecto de las altas temperaturas en el acero

El acero es un componente importante en las construcciones civiles. Ahora, muchas estructuras se construyen con acero como material estructural principal. El acero también es un material común que se utiliza como refuerzo en estructuras de hormigón armado. El acero sometido a

cargas a altas temperaturas sufrirá deformación mecánica, deformación térmica y deformación por fluencia (Wang *et al.*, 2019; Song *et al.*, 2020).

En caso de incendio, la temperatura de las barras de acero en la base aumentará bruscamente y las propiedades del material caerán rápidamente. La resistencia al fuego aumentará a medida que aumente la presión del hormigón. La temperatura alcanzando la superficie de acero afecta negativamente a la energía consumida por el sistema (Zheng & Zhuang, 2011; Kürklü, 2019).

Temperatura crítica del acero y el hormigón corresponde a la temperatura específica del fuego. La fuerza comienza a disminuir a partir de los 400°C, y desde el inicio del experimento, la reducción del acero utilizado comienza a partir de los 700°C. Esto puede deberse a diferencias en la cristalización del acero. Esto también muestra que la viga de hormigón armado subestimaré la resistencia al fuego (Kigha *et al.*, 2015)

En el impacto que tuvo el hormigón expuesto al fuego se observó que el elemento estructural reduce su resistencia a la adherencia debido al tiempo requerido para estabilizar la reacción interna del hormigón, que puede dañar la estructura (Jerônimo *et al.*, 2020).

Dado que las barras de acero longitudinales están directamente expuestas a altas temperaturas, además de reducir la sección transversal de las piezas, el pelado afectará la estabilidad de los componentes del hormigón armado. A diferencia del hormigón, las

barras de acero tienen una alta conductividad térmica, lo que permite que toda la sección transversal alcance altas temperaturas y pierda resistencia más rápidamente (Gil *et al.*, 2018).

El coeficiente de expansión térmica del hormigón y las barras de acero deben ser considerados como un parámetro importante para predecir el comportamiento de cambio en el fuego. Para satisfacer esta necesidad, el documento muestra el desarrollo y aceptación de modelos de elementos finitos no lineales que pueden simular el desempeño estructural de losas de polímero reforzado con fibra de vidrio al fuego (Hajiloo & Green, 2018; Ellis *et al.*, 2018).

El impacto en la estructura de hormigón armado comienza con el comportamiento del propio material. La pérdida de hormigón a altas temperaturas es menor que la del acero; así también el daño térmico entre la barra de refuerzo y el hormigón que cubre la barra de refuerzo dañará la adherencia. Los resultados muestran que los componentes de polímero reforzado con fibra de vidrio en concreto reforzado pueden seleccionarse como la forma más eficaz de abordar la protección contra incendios.

Resistencia a la flexión

La temperatura superficial alcanzada por las vigas de hormigón armado y los cambios físicos resultantes, el color del hormigón cambia de gris natural (sombras de hormigón que no han sido expuestas al fuego) a 750 °C a rosa y gris claro a 800 °C y 900 °C, el tono y el rango de temperatura, a

medida que el agregado grueso se expande y la base del cemento cambia durante el proceso de calentamiento, es más fácil exponerse a altas temperaturas. A temperaturas de 950 °C la resistencia a la flexión se reduce a un promedio de 63,11%, si el porcentaje de reducción de la resistencia a la flexión fue de 58,4%, los resultados asumidos pueden variar en función de los materiales utilizados, el diseño de la mezcla de hormigón, el refuerzo de las vigas, entre otros (Ureña-Aguirre & Alvarado-Aguirre, 2018).

La disminución de la propiedad mecánica principal del hormigón y el cambio de color son causados por el cambio de temperatura y composición del hormigón durante el proceso de cocción. Las propiedades mecánicas del hormigón después de altas temperaturas se ven afectadas; el contenido de agua, la cantidad de muestra, resistencia a la compresión. La resistencia a la flexión disminuye al aumentar la temperatura (Fernandes *et al.*, 2018).

La resistencia a la flexión disminuye drásticamente a medida que aumenta la temperatura y el tiempo que las vigas están expuestas al fuego. Se muestran varios signos de deterioro que van desde una leve calcinación y cambio de color hasta la pérdida uniforme de una parte del elemento.

Cuando la temperatura sube, la resistencia a la flexión y la carga máxima a menudo disminuyen bruscamente, lo que puede provocar daños estructurales indeseables. Al aumentar la temperatura, el color del hormigón armado cambia y las grietas se vuelven más serias y gruesas. Una temperatura de

750°C, la carga máxima se reduce en un 21,7%, y cuando la temperatura alcanza los 1050°C en 180 min, la carga máxima se reduce en casi un 100%.

La resistencia a flexión disminuye en más del 90% con respecto a las vigas no expuestas al fuego, el resultado obtiene una temperatura de 1050 °C a 180 min de exposición al fuego.

La conductividad térmica del hormigón ordinario a temperaturas de hasta 400 °C es muy baja y no aumenta significativamente a medida que la temperatura se eleva a aproximadamente 1000 °C.

La base de cemento no solo ayuda a mejorar la resistencia y durabilidad del sistema estructural, sino que proteger pasivamente al acero. El hormigón tiene la principal desventaja que sus propiedades materiales cambian con la temperatura y el desempeño del hormigón depende del rendimiento de sus componentes.

Aspectos éticos: Los autores declaran que se cumplieron con los principios y normativas éticas nacionales e internacionales para poder realizar el presente documento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul, H.B.; Mahboob, O. & Bashir-Ahmed, M. 2019. Flexural strength of reinforced concrete RAC beams exposed to 6-hour fire – Part 2: Rich mix. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9: 3813-3816.
- Agrawal, A. & Kodur, V. 2020. A novel experimental approach for evaluating residual capacity of fire damaged concrete members. *Fire Technology*, 56: 715-735.
- Ahmad, S.; Sallam, Y. & Al-Hawas, M. 2014. Effects of key factors on compressive and tensile strengths of concrete exposed to elevated temperatures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39: 4507-4513.
- Ahn, Y.; Jang, J. & Lee, H. 2016. Mechanical properties of lightweight concrete made with coal ashes after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 72: 27-38.
- Albuquerque, G. & Silva, V. 2013. Concrete beam fire design using co graphics. *BRACON Structures and Materials Journal*, 6: 513-536.
- Allam, S.; Elbakry, H. & Rabeai, A. 2013. Behavior of one-way reinforced concrete slabs subjected to fire. *Alexandria Engineering Journal*, 52: 749-761.
- Anand, N.; Godwin I, A. & Arulraj G, P. 2016. Influence of mineral admixtures on mechanical properties of self-compacting concrete under elevated temperature. *Fire and Materials*, 40: 940-958.
- Bamonte, P. & Lo Monte, F. 2015. Reinforced concrete columns exposed to standard fire: Comparison among different constitutive models for concrete at high temperature. *Fire Safety Journal*, 71: 310-323.
- Bodnárová, L.; Valek, J.; Sitek, L. & Foldyna, J. 2013. Effect of high temperatures on cement composite materials in concrete structures. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 10: 173-180.

- Buryk, O. & D. Drobenko, B. 2016. Stress-strain state of the elements of building structures in the case of fire. *Journal of Mathematical Sciences*, 21: 7330-344.
- Caldas, R.; Fakury, R. & Batista, M.J. 2014. Finite element implementation for the analysis of 3D steel and composite frames subjected to fire. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11: 1-18.
- de Assis Oliveira, J.; Ribeiro, J.; Pedroti, L.; de Faria, C.; Nalon, G. & de Oliveira, A. 2019. Durability of concrete after fire through accelerated carbonation tests. *Materials Research*, 22 (supl. 1): e20190049
- Ehrenbring, H.; Ortolan, V.; Bolina, F.; Pacheco, F.; Gil, A.M. & Tutikian, B.F. 2017. Residual strength evaluation of hollow core slabs of reinforced concrete of an industrial building after fire. *Matéria*, 22: e11874.
- Ellis, D.; Tabatabai, H. & Nabizadeh, A. 2018. Residual tensile strength and bond properties of GFRP bars after exposure to elevated temperatures. *Materials*, 11: 346.
- Endait, M. & Wagh, S. 2020. Effect of elevated temperature on mechanical properties of earlyage concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5: <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0254-8>.
- Fernandes, B.; Masiero-Gil, A., Longhi-Bolina, F., & Fonseca-Tutikian, B. 2018. Thermal damage evaluation of full scale concrete columns exposed to high temperatures using scanning electron microscopy and X-ray diffraction. *Dyna*, 85: 123-128.
- Gernay, T. 2019. Fire resistance and burnout resistance of reinforced concrete columns. *Fire Safety Journal*, 104: 67-78.
- Gil, A.; Fernandes, B.; Bolina, F. & Tutikian, B. 2018. Analysis of the assessment methods of reinforced concrete beams in fire conditions proposed by NBR 15200. *BRACON Structures and Materials Journal*, 11: 856-875.
- Hager, I. 2013. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 61: 145-154.
- Hajiloo, H. & Green, M. 2018. Post-fire residual properties of GFRP reinforced concrete slabs: A holistic investigation. *Composite Structures*, 201: 98-413.
- Han, L.H.; Tan, Q.H. & Song, T.Y. 2015. Fire performance of steel reinforced concrete columns. *Journal of Structural Engineer*, 141: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001081](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001081)
- Heidarpour, A.; Tofts, N.; Korayem, A.; LingZhao, X. & Hutchinson, C. 2014. Mechanical properties of very high strength steel at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 64: 27-35.
- Jafari, D.V. & Akbari, M. 2020. Data driven models for compressive strength prediction of concrete at high temperatures. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14: 311-321.
- Jerônimo, V.; Piccinini, A.; Silva, B.; Godinho, D.; Bernardin, S. & Vargas, A. 2020. Influence of the concrete mix on the bond strength of reinforced con-

- crete subjected to high temperatures. *BRACON Structures and Materials Journal*, 13: 212-221.
- Jin, L.; Bai, J.; Zhang, R.; Li, L. & Du, X. 2021. Effect of elevated temperature on the low-velocity impact performances of reinforced concrete slabs. *International Journal of Impact Engineering*, 149: 103797.
- Kigha, F.; Sadeeq, J. & Abejide, O. 2015. Effects of temperature levels and concrete cover thickness on residual strength characteristics of fire exposed reinforced concrete beams. *Nigerian Journal of Technology*, 34: 429-437.
- Krishna, D.; Priyadarsini, R. & Narayanan, S. 2019. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete. *Procedia Structural Integrity*, 14: 384-394.
- Kumar, V.; Sharma, U.K.; Singh, B. & Bhargava, P. 2013. Effect of temperature on mechanical properties of pre-damaged steel reinforcing bars. *Construction and Building Materials*, 46: 19-27.
- Kumar, C.H. & Agarwal, A. 2020. Effect of confining reinforcement on fire behavior of reinforced concrete columns: Experimental and numerical study. *Journal of Structural Engineering*, 146: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002617](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002617).
- Kürklü, G. 2019. Determination of physico-mechanical properties and high temperature behavior of stressed reinforcing steels. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 55: 924-935.
- Lakhani, H. & Özbolt, J. 2019. Structural behaviour of reinforced concrete (RC) columns under fire. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 615: 012088.
- Lubloy, E. 2020. How does concrete strength affect the fire resistance? *Journal of Structural Fire Engineering*, 11: 311-324.
- Maluk, C.; Woodrow, M. & Torero, J. L. 2017. The potential of integrating fire safety in modern building design. *Fire Safety Journal*, 88: 104-112.
- Manica, G.; Bolina, F.; Tutikian, B. & Valadares, M. 2019. Analysis of the fire resistance of solid concrete boards with polypropylene microfibers and long curing time. *Revista de la Construcción*, 18: 595-602.
- Naccache, E.; Pierin, I. & Silva, V. 2019. On the use of the parameter γz in a fire situation. *BRACON Structures and Materials Journal*, 12: 1327-1344.
- Onundi, L.; Oumarou, M. & Abba, M.A. 2019. Effects of fire on the strength of reinforced concrete structural members. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 7: 1-12.
- Pierin, I.; Silva, V. & La Rovere, H. 2015. Thermal analysis of two-dimensional structures in fire. *BRACON Structures and Materials Journal*, 8: 25-36.
- Quiel, S.; Irwin, C.; Naito, C. & Vermaak, N. 2020. Mechanical characterization of normal and high-strength steel bars in reinforced concrete members under fire. *Journal of Structural Engineering*, 146: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002644](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002644).

- Rozsypalova, I.; Schmid, P. & Danek, P. 2017. Determining the condition of reinforced and prestressed concrete structures damaged by elevated temperatures. *Procedia Engineering*, 195: 120-126.
- Ruvalcaba-Ayala, F. R., & Covarrubias-Navarro, M. 2017. Structural fire engineering a national approach and application example. *Ingenieria Investigacion y Tecnologia*, 18: 253-264.
- Ryu, E.; Kim, H.; Chun, Y.; Yeo, I. & Shin, Y. 2020. Effect of heated areas on thermal response and structural behavior of reinforced concrete walls exposed to fire. *Engineering Structures*, 207: 110165.
- Shariq, M.; Masood, A.; Umar, A.; Alam, M. & Haiyan, A. 2020. Residual load carrying capacity of reinforced concrete cylinders after heating at elevated temperature. *Research Article*, 2: 1-12.
- Simões, Y. & Santos, C. 2020. Contribution to fire-degraded reinforced concrete beams: Comparative analysis between structural reinforcement with carbon fibers and steel sheets. *Revista ALCONPAT*, 9: 48-64.
- Song, Y.; Fu, C.; Liang, S.; Yin, A. & Dang, L. 2019. Fire resistance investigation of simple supported RC beams with varying reinforcement configurations. *Advances in Civil Engineering*, 2019: 8625360.
- Song, Y.; Fu, C.; Liang, S.; Li, D.; Dang, L.; Sun, C.; & Kong, W. 2020. Residual shear capacity of reinforced concrete beams after fire exposure. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24: 3330-3341.
- Thanaraj, N.A.; Arulraj, P. & Al-Jabri, K. 2020. Investigation on structural and thermal performance of reinforced concrete beams exposed to standard fire. *Journal of Building Engineering*, 32: 101764.
- Tutikian, B.F.; Lerner, L.R.; Ehrenbring, H.Z.; Bolina, F.L. & Gil, A.M. 2020. Analysis of resistance to flow (f_y) and residual breakage (f_u) of concrete column reinforcement at high temperatures. *Ambiente Construído*, 21: 51-67.
- Ureña-Aguirre, M.E. & Alvarado-Aguirre, G. J. 2018. Effect of fire exposure time on the flexural strength of reinforced concrete beams. *Gaceta Técnica*, 19: https://www.scipedia.com/public/Aguirre_et_al_2018a.
- Wang, F.; Gardner, L. & Varma, A. 2019. Experimental and numerical studies of reinforced concrete columns confined by circular steel tubes exposed to fire. *Journal of Structural Engineering*, 145: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002416](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002416).
- Wang, Y.; Yuan, G.; Huang, Z.; Lyu, J.; Li, Q. & Long, B. 2018. Modelling of reinforced concrete slabs in fire. *Fire Safety Journal*, 100: 171-185.
- Zheng, Y.Q. & Zhuang, J. 2011. Analysis on fire resistance of reinforced concrete wall. *Advanced Materials Research*, 243: 797-800.

Received March 9, 2021.

Accepted April 26, 2021.