




**ARTÍCULO DE REVISIÓN****Evaluación del daño y recuperación de la capacidad portante del concreto tras la exposición al fuego**  
**Damage assessment and recovery of concrete bearing capacity after fire exposure**Kleiner Saucedo<sup>1</sup> , Donny Vásquez<sup>1</sup> , Zadith Garrido<sup>1</sup> **RESUMEN**

El presente artículo realiza un análisis comparativo de diversas investigaciones enfocadas en el desempeño del concreto frente a elevadas temperaturas, considerando particularmente la degradación y posible recuperación de su capacidad estructural tras un incendio. Se examinan estudios que abordan variables como el tipo de concreto utilizado, la incorporación de fibras metálicas o sintéticas, la adición de materiales puzolánicos, los métodos de enfriamiento aplicados y las técnicas de diagnóstico post-fuego. Los hallazgos revisados indican que el uso de fibras de acero o vidrio puede contribuir a mejorar la estabilidad térmica del concreto, aunque su efectividad depende del tipo de mezcla y de las condiciones térmicas alcanzadas. Del mismo modo, la incorporación de ceniza volante ha mostrado efectos positivos en la resistencia residual del concreto autocompactante. Se incluyen tanto enfoques experimentales como modelaciones teóricas que permiten evaluar daños térmicos y fenómenos como el desprendimiento explosivo (spalling). Esta revisión permite identificar patrones recurrentes, contradicciones metodológicas y vacíos de conocimiento, subrayando la necesidad de criterios unificados para la evaluación estructural post-incendio. En conjunto, se resalta el valor de integrar estos conocimientos en el diseño y recuperación de estructuras afectadas por el fuego.

**Palabras clave:** *concreto, fuego, resistencia, spalling, capacidad portante.*

**ABSTRACT**

This article presents a comparative analysis of various studies focused on concrete performance at high temperatures, particularly considering the degradation and possible recovery of its structural capacity after a fire. Studies are examined that address variables such as the type of concrete used, the incorporation of metallic or synthetic fibers, the addition of pozzolanic materials, the cooling methods applied, and post-fire diagnostic techniques. The reviewed findings indicate that the use of steel or glass fibers can contribute to improving the thermal stability of concrete, although their effectiveness depends on the type of mix and the thermal conditions achieved. Similarly, the incorporation of fly ash has shown positive effects on the residual strength of self-compacting concrete. Both experimental approaches and theoretical models are included, allowing for the assessment of thermal damage and phenomena such as spalling. This review identifies recurring patterns, methodological contradictions, and knowledge gaps, highlighting the need for unified criteria for post-fire structural assessment. Overall, the value of integrating this knowledge into the design and recovery of fire-damaged structures is highlighted.

**Keywords:** concrete, fire, strength, spalling, load-bearing capacity.

\* Autor para correspondencia

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Jaén. Email: [kleiner.saucedo@est.unj.edu.pe](mailto:kleiner.saucedo@est.unj.edu.pe)

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Jaén. Email: [donny.vasquez.@est.unj.edu.pe](mailto:donny.vasquez.@est.unj.edu.pe)

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Jaén. Email: [zadith.garrido@unj.edu.pe](mailto:zadith.garrido@unj.edu.pe)

## INTRODUCCIÓN

El concreto, un material fundamental en la construcción moderna, valorado por su resistencia inherente al fuego; sin embargo, su exposición a altas temperaturas durante incendios induce cambios físicos, químicos y microestructurales que comprometen su capacidad portante y la seguridad estructural de las edificaciones (Kodur, 2014; Aguirre & Aguirre, 2018). Fenómenos como la pérdida de resistencia, el agrietamiento, el desprendimiento explosivo (spalling) y las alteraciones en la matriz cementicia afectan su funcionalidad, lo que resalta la necesidad de evaluar el daño térmico y desarrollar estrategias efectivas de rehabilitación (Silva, 2025; Jansson, 2013). La investigación reciente ha abordado el comportamiento de diversos tipos de concreto bajo condiciones de incendio, incluyendo el concreto armado tradicional, autocompactante (SCC), de alta resistencia (HPC), de ultra-alta resistencia (UHPC), liviano y mampostería, considerando variables como el tipo de material, aditivos, fibras, duración del fuego, métodos de enfriamiento y técnicas de evaluación post-incendio (Aboud et al., 2024; Heiza, 2012; Durmaz, 2025; Estevan et al., 2024).

Estudios experimentales han demostrado que la incorporación de aditivos como ceniza volante, humo de sílice o nanosílice, y fibras (de acero, vidrio o poliméricas) mejora la resistencia térmica y la capacidad residual del concreto hasta ciertos rangos de temperatura, aunque la degradación es significativa a temperaturas superiores a 700-1000°C (Abdelrahim et al., 2021; Kessel et al., 2023). Por ejemplo, el SCC con fibras de vidrio muestra un mejor desempeño hasta 700°C (Aboud et al., 2024), mientras que el UHPC retiene propiedades hasta 600°C (Estevan et al., 2024). Asimismo, investigaciones como las de Oliveira et al. (2021) y Qiao et al. (2022) destacan la importancia de la distribución térmica y el modelado del spalling para predecir el daño. Por su parte, los métodos desarrollados por Alonso y Flor-Laguna (2013), para determinar la profundidad del daño térmico han proporcionado herramientas esenciales para el diagnóstico y la toma de decisiones en la rehabilitación de estructuras.

Esta revisión literaria sintetiza los avances en la evaluación del daño por fuego y la recuperación de la capacidad portante del concreto, integrando enfoques experimentales, numéricos y teóricos. Se analizan los patrones clave en el comportamiento de distintos tipos de concreto, el impacto de aditivos y fibras, los efectos de los métodos de enfriamiento y las estrategias de restauración propuestas (Cuyán et al., 2021; Kiran et al., 2018). Con ello, se busca contribuir al diseño de estructuras más resilientes al fuego, optimizar las técnicas de rehabilitación y abordar las brechas en la literatura actual para garantizar la seguridad y durabilidad de las edificaciones afectadas por incendios. En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo realizar una revisión comparativa de investigaciones recientes sobre el desempeño del concreto expuesto al fuego, enfocándose en la degradación térmica, la pérdida de capacidad portante y las estrategias de recuperación estructural.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo una revisión sistemática de estudios publicados entre 2012 y 2024, obtenidos de bases de datos como Scopus, Scielo y ScienceDirect, enfocada en evaluar el impacto de altas temperaturas en la resistencia de diversos tipos de concreto (convencional, liviano, reforzado, autocompactante, reciclado y de ultra alto desempeño). Se priorizaron investigaciones con enfoques experimentales, modelos teóricos y análisis estructurales post-incendio, considerando el tipo de concreto, temperatura máxima, métodos de enfriamiento, incorporación de fibras o aditivos y técnicas de evaluación del daño. Las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, tracción, flexión, módulo de elasticidad), térmicas (spalling, transferencia de calor) y microestructurales (fisuras, porosidad, descomposición química) se analizaron mediante ensayos de compresión (ASTM C39), tracción por compresión (ASTM C496), flexión (ASTM C78), módulo de elasticidad (ASTM C469), microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis termogravimétrico (TGA), espectroscopia infrarroja (FTIR), difracción de rayos X (DRX), porosimetría por intrusión de mercurio (MIP) y modelado con elementos finitos (ANSYS, Abaqus). El análisis estadístico empleó ANOVA y pruebas de Tukey.

La evaluación experimental incluyó el diseño de concretos con materiales locales, utilizando cemento Portland tipo I (resistencia a compresión: 306-433 kg/cm<sup>2</sup>) y relaciones agua/cemento de 0.40-0.50, optimizadas con superplastificantes (0.5-0.8% en peso) (Qiao et al., 2022; Alonso & Laguna, 2013). Se emplearon agregados como arena silíceo (tamaño máximo 4-5 mm, densidad 2620-2650 kg/m<sup>3</sup>), gravas basálticas o calizas (tamaño máximo 12-20 mm, densidad 2680-2700 kg/m<sup>3</sup>), arcilla expandida (LECA, densidad ~1100 kg/m<sup>3</sup>) y pumita (~900 kg/m<sup>3</sup>) para concretos livianos (Kuehnen et al., 2022; Kang & Weibin, 2018). Se incorporaron aditivos como nanosílice (1-3% en peso, diámetro 15 nm, pureza >99.8% SiO<sub>2</sub>) y PET reciclado (5-15% en volumen, tamaño 2-10 mm, densidad 1380 kg/m<sup>3</sup>), así como fibras de acero, polipropileno, vidrio o híbridas (basalto-aramida) en proporciones de 0.5-2% (Aboud et al., 2024; Dyson & Shankar, 2024). El refuerzo estructural se realizó con barras de acero (límite elástico: 4200 kg/cm<sup>2</sup>) y láminas CFRP (Alzamili et al., 2023). Los especímenes (cubos de 100-150 mm, cilindros de 100×200 mm o 150×300 mm, prismas de 100×100×400 mm, vigas de 200×300 mm) se fabricaron según ASTM C192 (ASTM International, 2019), con nanosílice dispersada mediante ultrasonificación durante 1800 s (Liu et al., 2024). El curado se realizó durante 28 días en agua (20-23 °C) o cámaras con 95% de humedad relativa (20 °C).

Los ensayos evaluaron el comportamiento bajo temperaturas de 200-1300 °C, con métodos de enfriamiento natural, acelerado o con agua, analizando spalling, resistencia y deformaciones en cámaras térmicas (Jansson, 2013; Oliveira et al., 2021; Vitorino et al., 2024). Se realizaron pruebas de compresión, tracción, flexión (incluyendo flexión a cuatro puntos durante exposición al fuego, Kodur, 2014), módulo de elasticidad y pérdida de masa, con tres repeticiones por condición. Las variables incluyeron tipo de agregado (LECA, pumita, grava), aditivos (nanosílice, PET, ceniza volante) y temperatura. Los análisis microestructurales emplearon SEM, TGA, FTIR, DRX y MIP para evaluar fisuras, descomposición química y porosidad (ASTM International, 2020; Ning et al., 2022). El modelado numérico se realizó con ANSYS (leyes constitutivas no lineales, Kodur, 2014) y gemelos digitales en Python (Liu et al., 2024). Estrategias como el uso de fibras híbridas y materiales reciclados (GGBS, agregado reciclado 20-60%) se evaluaron experimentalmente (Saqib et al., 2025; Nazri et al., 2017).

**Tabla 1***Cuadro de resumen de los métodos y muestras analizadas*

Tipo de Hormigón	Autor(es) y Año	Materiales y Aditivos	Rango de Temperatura (°C)	Métodos de Ensayo	Propiedades Evaluadas	Aplicación Principal
Convencional	Qiao et al (2022)	Agente expansivo (8%), ceniza volante, aditivo químico	800, 1000 (40 °C/min, 30 min)	Enfriamiento natural	Spalling	Estructuras
	Alonso & Flor-Laguna, (2013)	Cemento Portland	300, 500	Enfriamiento natural	Resistencia	Estructuras
	Jansson (2013)	Cemento Portland	200 - 600	Enfriamiento natural	Resistencia, Spalling	Estructuras
	Kiran et al (2018)	Cemento Portland	600, 800	Enfriamiento natural, agua, estado caliente	Resistencia, análisis térmico	Estructuras
	Oliveira et al. (2021)	Ceniza volante (10–20%)	200–600	Enfriamiento acelerado	Resistencia, Spalling	Estructuras
	Paszteńnik & Wróblewski (2021)	Cemento Portland	600	Enfriamiento natural	Resistencia	Estructuras
	Wróblewska & Kowalski (2020)	Cemento Portland	400, 600	Enfriamiento natural	Resistencia	Estructuras
	Noman et al. (2022)	Epóxido y acero	400, 800	Enfriamiento con agua, epóxido	Resistencia	Estructuras
Tipo de concreto	Autor(es) y Año	Materiales y Aditivos	Rango de Temperatura (°C)	Métodos de Ensayo	Propiedades Evaluadas	Aplicación Principal
Convencional	Kang & Li, (2018)	Sustitución de agregado 0–100 %	Hasta 800 (curva ISO 834)	Enfriamiento natural	Resistencia, deformación	Estructuras generales

	Kuehnen et al. (2022)	Agregado reciclado (20–30%)	200–500	Enfriamiento posterior al fuego	Resistencia	Estructuras
UHPC (Concreto de ultra alto desempeño)	Van der Merwe, (2023)	Cemento HS y HSC	No especificado	Enfriamiento posterior al fuego	Spalling explosivo, permeabilidad	Estructuras
	Kaura et al., (2023)	Fibras híbridas simples	No especificado	Enfriamiento natural	Resistencia térmica	Construcción avanzada
	Mehran et al., (2023)	fibras híbridas	No específico	Enfriamiento natural	Resistencia ,spalling	Pavimentos y estructuras
	(Kang & Wei, 2018)	fibras individuales e híbridas	400–600	Enfriamiento natural	Spalling, Resistencia, microestructura	Pavimento
Reforzado	Elif et al., (2025)	Fibras de polipropileno, poliamida y vidrio	300–600	Ensayos térmicos, enfriamiento natural	Resistencia térmica superficial	Estructuras
	Saqib et al., (2025)	Agregado reciclado, fibras metálicas, fibras poliméricas	300–600	Ensayos térmicos y mecánicos	Resistencia, sostenibilidad	Estructuras
	Dyson & Shankar, (2024)	Fibras de basalto y aramida combinadas	250 - 500	Ensayos compresión y tracción dividida	Resistencia a compresión y tracción dividida	Estructuras
	Alzamili et al., (2023)	Láminas CFRP, fibras de acero, 2% vol.	200, 500	Simulación numérica, ensayos mecánicos	Resistencia	Estructuras
	Nazri et al., (2017)	UHPC con fibras múltiples	200 – 400 – 600	Ensayos térmicos y mecánicos	Spalling, resistencia post-incendio	Estructuras
	Minh et al., (2023)	GGBS 20–60 % más agregado reciclado	200–800	Compresión, tracción, módulo	Resistencia, módulo elástico	Elementos sostenibles
Autocompactante (SCC)	Aboud et al. (2024)	Fibras de vidrio (0.5-1%)	200–700	enfriamiento natural, acelerado	Resistencia, Spalling	Estructuras
	Ning et al., (2022)	Fibras de acero y polipropileno	200–1000	Compresión, flexión, pérdida de masa	Spalling, resistencia residual	Estructuras
	Heiza (2012)	Ceniza volante (10–20%)	200 - 700	Enfriamiento acelerado	Resistencia	Estructuras
	(Gebre et al., 2024)	Fibras de vidrio	200–700	Enfriamiento acelerado	Resistencia, Spalling	Estructuras
<b>Tipo concreto</b>	<b>Autor(es) y Año</b>	<b>Materiales y Aditivos</b>	<b>Rango de Temperatura (°C)</b>	<b>Métodos de Ensayo</b>	<b>Propiedades Evaluadas</b>	<b>Aplicación Principal</b>
Armado	Yamanaka & otros (2024)	Cemento Portland	600 - 1300	Enfriamiento natural	Propiedades térmicas	Estructuras
	Yağan y otros (2024)	Cemento Portland	200–800	Enfriamiento natural	Resistencia	Vigas

Armado	Aguirre & Aguirre (2018)	Cemento Portland	400, 800	Enfriamiento natural / acelerado	Resistencia	Vigas,
Compactado	Ünverdi et al. (2025)	Fibras de acero , polipropileno	25, 300, 600, 900	Enfriamiento natural	Spalling, Resistencia	Pavimentos
Silíceos	Vitorino et al. (2024)	Agregados silíceos	942.5 (exposición a curva ISO 834; por 1 hora)	Enfriamiento natural	Resistencia	Estructuras
Polvo reactivo (RPC)	Abdelrahim et al., (2021)	Fibras de acero (1-2%)	200 - 800	Enfriamiento natural	Resistencia	Estructuras

## RESULTADOS

Los estudios revisados muestran que la exposición del concreto a altas temperaturas (600–850 °C) puede reducir su resistencia a compresión entre 20 % y 70 %, dependiendo de la composición de la mezcla y los aditivos incorporados. Diversas investigaciones evidencian que la inclusión de fibras metálicas o de vidrio atenúa la pérdida de resistencia en 10–25 %, mientras que la adición de ceniza volante puede incrementar la resistencia residual hasta 15 % en concreto autocompactante. Asimismo, los métodos de enfriamiento post-incendio influyen en la absorción de agua, con incrementos de 3–8 %, reflejando un aumento de la porosidad y el riesgo de desprendimiento explosivo (spalling). En conjunto, estos hallazgos indican que un enfoque integral considerando la composición del concreto, los refuerzos y las estrategias de enfriamiento es esencial para optimizar la recuperación estructural.

### Degradación de Propiedades Mecánicas

#### Resistencia a Compresión

Diversas investigaciones realizadas han documentado que la exposición a altas temperaturas provoca una reducción significativa en la resistencia a compresión del concreto, influenciada por la temperatura alcanzada, tiempo de exposición, el tipo de concreto y los materiales incorporados. Kodur (2014) determinó que el concreto convencional disminuye entre el 20-50% de su resistencia a compresión a temperaturas superiores a 400°C, debido a la deshidratación de los hidratos de cemento y la formación de microfisuras. En contraste, Abdelrahim et al. (2021) el concreto de polvo reactivo (RPC) con fibras de acero (1 - 2%) muestra una disminución del 10- 30% de la resistencia a 600 °C, atribuido a su impermeabilidad, su matriz compacta y baja porosidad. Así mismo Minh et al. (2023) examinaron concretos con agregados reciclados y escoria de alto horno granulada molida (GGBS, 20-60%) reduce la pérdida de resistencia a compresión a 15-25% a 800°C, en comparación con el 40-60% en concretos convencionales.

## **Resistencia a Flexión**

La exposición al fuego afecta gravemente la resistencia a la flexión de elementos estructurales como vigas de concreto armado. Aguirre y Aguirre (2018) reportaron una reducción del 30-50% en la resistencia a flexión de vigas expuestas a 600°C tras 60 minutos de exposición, mientras que Yağan et al. (2024), observan pérdidas de hasta el 60% a 800°C en vigas armadas, asociadas a daños microestructurales severos. Alzamili et al. (2023) encontraron que el concreto reforzado con láminas de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) retiene hasta un 70% de su capacidad de flexión a 500°C, debido a la capacidad de las fibras para redistribuir las tensiones. Asimismo, Ünverdi et al. (2025) reportaron que el concreto compactado con fibras de acero limita las pérdidas de resistencia a flexión a un 20-35% a 600°C, al mitigar la propagación de fisuras.

## **Resistencia a Tracción**

La resistencia a tracción es altamente sensible a las altas temperaturas, con pérdidas significativas debido a microfisuras y descomposición química. Silva et al. (2025) reportaron una disminución del 40-60% a 700°C en concreto convencional, atribuida a la formación de microfisuras y la descomposición química de la matriz cementicia, mientras que Aboud et al. (2024) y Gebre et al. (2024) investigaron que el concreto autocompactante (SCC) con fibras de vidrio (0.5-1%) exhibe una reducción de solo 20-30% a 700°C. Dyson y Shankar (2024) destacaron que las fibras híbridas (basalto-aramida) permiten retener hasta un 80% de la resistencia a tracción a 500°C, Nazri et al. (2017) confirmó que el UHPC con fibras múltiples reduce las pérdidas a un 15-25% a 600°C.

## **Módulo de Elasticidad**

El módulo de elasticidad del concreto se reduce drásticamente con el aumento de la temperatura, afectando la rigidez estructural. Cuyán et al. (2021) obtuvieron una pérdida del 60-70% a 600°C en concreto convencional, mientras que el UHPC retiene aproximadamente el 50% de su módulo de elasticidad a 700°C debido a su microestructura densa (Estevan et al., 2024). Durmaz (2025) determinó que la incorporación de fibras de acero y aditivos como sílice mejora la retención, con pérdidas de 30-40% a 800°C incluso bajo condiciones extremas como radiación gamma. Así mismo Minh et al. (2023) identificó que el uso de GGBS en concreto con agregados reciclados limita la reducción del módulo de elasticidad a un 25-35% a 800°C.

## **Fenómeno de Spalling**

El *spalling* es un fenómeno crítico en concretos densos, especialmente en UHPC y HPC, debido a la acumulación de presión de vapor en la matriz. Qiao et al. (2022) y Jansson (2013) determinaron que el *spalling* ocurre principalmente entre 200-600°C, siendo más severo en concretos de alta resistencia (HPC) y UHP, debido a su baja permeabilidad. La incorporación de fibras de polipropileno, vidrio o híbridas reduce significativamente el *spalling* al facilitar la liberación de vapor (Ning et al., 2022; Elif et al., 2025; Saqib et al., 2025). Así mismo Van der Merwe (2023) destaca que el UHPC con fibras de acero muestra una reducción del *spalling* en un 40-50% a 600°C. Sin embargo, Oliveira et al. (2021) observó que el enfriamiento acelerado tras la exposición al fuego exacerba el *spalling* en un 15-20% debido a choques térmicos.

## **Efecto de Aditivos y Fibras**

La incorporación de aditivos y fibras como ceniza volante (10-20%), humo de sílice, o nanosílice (1-3%) mejora la resistencia térmica y la capacidad residual del concreto. Heiza (2012) y Kaura et al. (2023) determinaron que la ceniza volante en SCC incrementa la resistencia a compresión residual en un 10 - 15% a 700°C, al reducir la porosidad y mejorar la cohesión de la matriz. Las fibras de acero, vidrio, polipropileno o híbridas (basalto-aramida) mitigan el agrietamiento y el *spalling*, con mejoras de hasta un 30% en la resistencia a tracción y flexión (Dyson y Shankar, 2024; Aboud et al., 2024; Ünverdi et al., 2025). Sin embargo, la efectividad depende de la proporción (0.5-2%) y la distribución homogénea de las fibras, con resultados menos consistentes en concretos compactados a 900°C (Ünverdi et al., 2025).

## **Estrategias de Recuperación de la Capacidad Portante**

La restauración de la capacidad portante incluye técnicas como el refuerzo con CFRP, epóxidos, y morteros de reparación. Noman et al. (2022) determinaron que la aplicación de epóxidos y refuerzos de acero restaura hasta un 80% de la resistencia a compresión a 400°C, aunque la efectividad disminuye a 50% a 800°C. Alzamili et al. (2023) identificaron que las láminas CFRP incrementan la capacidad de flexión en un 60-70% en elementos dañados a 500°C. Saqib et al. (2025) propusieron morteros de reparación con agregados reciclados y fibras metálicas, logrando una recuperación del 70-85% de la resistencia a tracción a 600°C. Sin embargo, las estrategias de reparación son menos efectivas en concretos expuestos a temperaturas superiores a 800°C debido al daño microestructural irreversible (Mehran et al., 2023).



## DISCUSIÓN

Las investigaciones han demostrado que la exposición al fuego reduce significativamente las propiedades mecánicas del concreto de 55-85% a 600-1000°C, Abdelrahim et al. (2021) y Mehran et al. (2023) afirman que con el UHPC y SCC mejorados con nanosílice y fibras de acero o vidrio, generan una retención superior, conservando entre 60% y 90% de su resistencia a 600°C debido a su matriz densa y mayor cohesión térmica. En contraste, el PET reciclado agrava el daño por su fusión a temperaturas cercanas a 400°C (Albiajawi et al., 2024); el *spalling* es mitigado por fibras de vidrio y acero hasta 700°C (Aboud et al., 2024), pero persiste en concretos densos a 1000°C, el enfriamiento natural preserva mejor la resistencia que el enfriamiento con agua y facilita reparaciones con epóxidos (Noman et al., 2022), las técnicas de evaluación (SEM, TGA, FTIR, DRX, MIP) y modelado numérico (Kodur, 2014) ofrece diagnóstico preciso, pero requieren calibración para fuegos no normativos y estructuras mixtas, sugiriendo la necesidad de normativas unificadas para optimizar el diseño y rehabilitación de estructuras resilientes al fuego.

## CONCLUSIONES

En definitiva la revisión sistemática revela que la exposición al fuego reduce las propiedades mecánicas del concreto en un 55-85% a temperaturas de 600-1000°C, aunque los concretos de ultra-alto desempeño y autocompactantes, mejorados con nanosílice y fibras de acero o vidrio, conservan hasta un 60-90% de su resistencia a 600°C gracias a su matriz compacta y mayor cohesión térmica, mientras que el PET reciclado intensifica el daño por su fusión a bajas temperaturas; las fibras mitigan el desprendimiento explosivo hasta 700°C, pero no a 1000°C en concretos densos; el enfriamiento natural preserva mejor la capacidad portante frente al enfriamiento con agua, que facilita reparaciones con materiales compuestos; las técnicas de evaluación microestructural y el modelado numérico proporcionan diagnósticos precisos, pero requieren calibración para fuegos no normativos y estructuras mixtas, lo que subraya la necesidad de normativas unificadas para optimizar el diseño de estructuras resilientes al fuego y la rehabilitación con materiales compuestos y morteros reciclados, garantizando mayor seguridad y durabilidad en edificaciones afectadas por incendios.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelrahim, M. A. A., Elthakeb, A., Mohamed, U., & Noaman, M. T. (2021). Behavior of Reactive Powder Concrete Beams Exposed to Fire. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 14(4), 1-12. <https://doi.org/10.24237/djes.2021.14401>
- Aboud, R. K., Awad, H. K., & Mohammed, S. D. (2024). Effect of Fire Exposure on the Properties of Self-Compacting Concrete reinforced by Glass Fibers. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(2), 13369-13375. <https://doi.org/10.48084/etasr.6924>
- Aguirre, M. E. U., & Aguirre, G. J. A. (2018). Efecto del tiempo de exposición al fuego en la resistencia a flexión de vigas de hormigón armado. *Gaceta Técnica*, 19(2), 7-18. <https://www.redalyc.org/journal/5703/570360789001/html/b>
- Albiajawi, M. I., Wahppe Alkasawneh, R., Mostafa, S. A., Johari, I., Embong, R., & Muthusamy, K. (2024). Performance of sustainable concrete containing recycled latex gloves and silicone catheter under elevated temperature. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 36(3), 186-198. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.11.008>
- Alonso, A. M. Cruz., & Flor-Laguna, L. V. (2013). Determinación de la profundidad de daño en estructuras de hormigón post-incendio. *Redalyc*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.21041/ra.v3i1.39>
- Alzamili, H. H., Хаким, А. Х., Elsheikh, A. M., & Мохамед, Э. А. (2023). Performance of reinforced concrete elements strengthened with carbon fiber CFRP at elevated temperatures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 19(5), 502-509. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-5-502-509>
- Cuyán, A. E. B., Mio, J. L. M., & Muñoz, S. P. P. (2021). Comportamiento Térmico y Estructural del Concreto Expuesto a Altas Temperaturas: Una Revisión de la Thermal and Structural Behaviour of Concrete Exposed To High Temperatures: A Review of the Literature. *Investigatio*, 16, 78-93. <https://doi.org/10.31095/investigatio.2021.16.7>
- Durmaz, M. (2025). Synergistic Effects of Steel Fibers and Silica Fume on Concrete Exposed to High Temperatures and Gamma Radiation. *Buildings*, 15(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/buildings15111830>
- Dyson, C., & Shankar, V. G. R. (2024). Fortifying flames: Boosting concrete fire resistance with hybrid fiber polymers. *Scielo*, 29(03), 14. <https://www.scielo.br/j/rmat/a/fNfF7rJNxcBRbC8H4m3TCFP/>

- Elif, H. B., Kaya, Y., Mardani, A., & Şenkal, F. S. (2025). Improving fire resistance of lightweight concrete facade elements by using fibers. *Springer*, 25(70), 18. <https://doi.org/10.1007/s43452-025-01133-6>
- Estevan, L., Torres, B., Baeza, F. J., Gattulli, V., & Ivorra, S. (2024). Enhancing fire resistance of masonry structures: The potential of ultra high performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 425, 136088. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136088>
- Gebre, Y., Gebremariam, H., & Tarekegn, A. G. (2024). BEHAVIOR OF CONCRETE UNDER FIRE EXPOSURE. *European Journal of Materials Science and Engineering*, 9(4), 281-294. <https://doi.org/10.36868/ejmse.2024.09.04.281>
- Heiza, K. M. (2012). Performance of Self-Compacted Concrete Exposed to Fire or Aggressive Media. *Challenge Journal*, 3(2), 406-425. <https://www.challengejournal.com/index.php/cjrl/article/view/147>
- Jansson, R. (2013). Fire spalling of concrete – A historical overview. *MATEC Web of Conferences*, 6, 01001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20130601001>
- Kang, M., & Wei, bin L. (2018). Effect of the Aggregate Size on Strength Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Wiley*, 2018(1). <https://doi.org/10.1155/2018/2428576>
- Kaura, P., Mohapatra, B., Ojha, P. N., Singh, B., Kumar, S., & Liju, V. (2023). Fresh, hardened and durability properties of concrete made with flyash and limestone based Portland composite cement. *Journal of Asian Concrete Federation*, 9, 1-16. <https://doi.org/10.18702/acf.2023.9.1.1>
- Kessel, O., Bennia, A., Bravo Hidalgo, D., Abderraouf Belkadi, A., Lyes Kamel Khouadjia, M. (2023). Investigación experimental del hormigón de alta resistencia sometido a altas temperaturas. *Revista ingeniería de construcción*, 38(1), 114-126. <https://doi.org/10.7764/ric.00056.21>
- Kiran, K. P., Chiranjeevi, R. R., & Chiranjeevi, R. (2018). (PDF) Strength Studies on Different Grades of Concrete Considering Fire Exposure. *ResearchGate*, 6(1), 23. <https://doi.org/10.11648/j.ajce.20180601.14>
- Kodur, V. (2014). Properties of Concrete at Elevated Temperatures. *ISRN Civil Engineering*, 2014(1), 1-15. <https://doi.org/10.1155/2014/468510>
- Kuehnen, R., Youssef, M., & El-Fitiany, S. (2022). Influence of Natural Fire Development on Concrete Compressive Strength. *Fire*, 5, 34. <https://doi.org/10.3390/fire5020034>
- Liu, C., Wang, P., Wang, X., & Miao, J. (2024). Autonomous damage segmentation of post-fire reinforced concrete structural components. *Advanced Engineering Informatics*, 61, 102498. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102498>
- Mehran, K., Mingfeng, K., Muhammad, A., Jiancong, L., & Jian, G. D. (2023). *Fire Performance of*

- Fiber-reinforced Ultra-High-Performance Concrete: A state-of-the-art review.* 9(1), 66-101. <https://dx.doi.org/10.18702/acf.2023.9.1.65>
- Minh, T. T., Le, D.-H., & Emmanuel, O. B. (2023). Investigation of Post Fire Mechanical Performance of Recycled Aggregate Concrete Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag. *E3S Conferencia*, 437(03003), 14. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343703003>
- Nazri, F. M., Jaya, R. P., Abu Bakar, B. H., & Ahmadi, R. (2017). Fire resistance of ultra-high performance fibre reinforced concrete due to heating and cooling. *MATEC Web of Conferences*, 87, 01021. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20178701021>
- Ning, X., Li, J., & Li, Y. (2022). An Explorative Study into the Influence of Different Fibers on the Spalling Resistance and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete after Exposure to Elevated Temperatures. *researchgate*, 12(12779), 17. <https://doi.org/10.3390/app122412779>
- Noman, M., Yaqub, M., Abid, M., Musarat, M. A., Vatin, N. I., & Usman, M. (2022). Effects of Low-Cost Repair Techniques on Restoration of Mechanical Properties of Fire-Damaged Concrete. *Frontiers in Materials*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.801464>
- Oliveira, R. G., Rodrigues, J. P. C., Miguel Pereira, J., Lourenço, P. B., & Lopes, R. F. R. (2021). Experimental and numerical analysis on the structural fire behaviour of three-cell hollowed concrete masonry walls. *Engineering Structures*, 228, 111439. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111439>
- Pasztetnik, M., & Wróblewski, R. (2021). A Literature Review of Concrete Ability to Sustain Strength after Fire Exposure Based on the Heat Accumulation Factor. *Materials*, 14(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/ma14164719>
- Qiao, R., Guo, Y., Zhou, H., & Xi, H. (2022). Explosive Spalling Mechanism and Modeling of Concrete Lining Exposed to Fire. *Materials*, 15(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ma15093131>
- Saqib, M. K., Imran, M. K., M., R. C., Hussain, S. K., & Ahmed, A. (2025). *Performance analysis of fiber reinforced recycled aggregate concrete at elevated temperatures using response surface methodology.* 15(12916), 17. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94258-w>
- Silva, W., Souza, L., Ramalho, E., Felipe, A., & Pereira, L. (2025). Impacto de elevadas temperaturas na resistência à tração do concreto: Uma análise experimental. *Caderno Pedagógico*, 22(1), e13534. <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n1-204>
- Ünverdi, M., Kaya, Y., Mardani, N., & Mardani, A. (2025). Investigation of the Microstructural and Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Roller-Compacted Concrete Under High-Temperature Exposure. *Materials*, 18(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/ma18112430>
- Van Der Merwe, J. (2023). Desconchado del hormigón en caso de incendio: Visión general y relevancia

local. *Revista de la Institución Sudafricana de Ingeniería Civil*, 62(2), 2-9.  
[https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1021-20192023000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=en](https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-20192023000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=en)

- Vitorino, H., Vila Real, P., Couto, C., & Rodrigues, H. (2024). Parametric analysis of post-earthquake fire resistance of reinforced concrete frames without seismic design. *Engineering Structures*, 303, 117556. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117556>
- Wróblewska, J., & Kowalski, R. (2020). Assessing concrete strength in fire-damaged structures. *Construction and Building Materials*, 254, 119122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119122>
- Yağan, M., Özkal, F. M., Öztürk, M. O., & Polat, M. (2024). Investigation of the Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams at Elevated Temperatures. *ACS Omega*, 9(8), 9593-9602. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09403>
- Yamanaka, F., Souza, R., & Teixeira, M. (2024). Análise das propriedades térmicas de uma parede de concreto armado submetido a temperaturas extremas. *Contribuciones a las ciencias sociales*, 17, e13277. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.13-045>