

Acciones y efectos nocivos del fuego sobre estructuras de concreto. Una breve reseña

C. Britez^{1*}, M. Carvalho², P. Helene³ 

*Autor de Contacto: britez.consultoria@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i1.421>

Recepción: 07/06/2019 | Aceptación: 11/11/2019 | Publicación: 30/12/2019

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo presentar y discutir brevemente algunos temas esenciales sobre la acción del fuego en las estructuras de concreto y los posibles efectos nocivos de las altas temperaturas en el material concreto. Se realizó una revisión de la literatura, que aborda el comportamiento del concreto (visto como un material y como un elemento estructural) cuando se expone a acciones térmicas excepcionales y severas de un escenario de incendio, lo que contribuye a desmitificar algunas creencias y dudas sobre el fenómeno de ocurrencia de *spalling* y el comportamiento de la estructura de concreto armado en situación de incendio.

Palabras clave: fuego; estructuras de concreto; *spalling*.

Citar como: Britez, C., Carvalho, M., Helene, P. (2020), "*Acciones y efectos nocivos del fuego sobre estructuras de concreto. Una breve reseña*", Revista ALCONPAT, 10 (1), pp. 1 – 21, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i1.421>

¹ Pesquisador de Pós-Doutorado na Escola Politécnica da USP, Britez Consultoria, São Paulo, Brasil.

² Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil.

³ Professor Titular da Escola Politécnica da USP, PhD Engenharia, São Paulo, Brasil.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2020.

Fire impacts on concrete structures. A brief review

ABSTRACT

This paper aims to present briefly discuss some essential topics about the impact of fire on concrete structures and the possible deleterious effects of high temperatures on the concrete material itself. A literature review was conducted, addressing the behavior of concrete (seen as a material and as a structural element) when exposed to exceptional and severe actions from a fire scenario, contributing to demystify some beliefs and doubts about the spalling phenomenon and the behavior of reinforced concrete under fire situations.

Keywords: fire; concrete structure; *spalling*.

Ações e efeitos deletérios do fogo em estruturas de concreto. Uma breve revisão

RESUMO

Este artigo tem o objetivo de apresentar e discutir brevemente alguns tópicos essenciais sobre a ação do fogo nas estruturas de concreto e quais os eventuais efeitos deletérios das elevadas temperaturas no material concreto propriamente dito. Foi realizada uma revisão da literatura, abordando o comportamento do concreto (visto como um material e como um elemento estrutural) quando exposto às ações térmicas excepcionais e severas procedentes de um cenário de incêndio, contribuindo para desmistificar algumas crenças e dúvidas quanto ao fenômeno de ocorrência de *spalling* e ao comportamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio.

Palavras-chave: incêndio, estrutura de concreto, *spalling*.

1. INTRODUCCIÓN

En el tema de la concepción de estructuras y la acción excepcional del fuego en comparación con otros materiales de construcción (sin protección), el concreto tiene una serie de atributos, como se puede ver en la Figura 1. En este contexto, se enfatiza que hay dos componentes principales responsables del desempeño positivo del concreto en una situación de incendio: el primero relacionado con las propiedades intrínsecas del material y el segundo con su funcionalidad cuando se inserta en la estructura general.

Materiales de construcción (sin protección)	Resistencia al fuego	Facilidad de combustión	Contribución a las cargas de incendio	Velocidad de aumento de temperatura en sección transversal	Protección contra fuego (intrínseca del material)	Facilidad de rehabilitación (posterior a incendios)	Protección de evacuación y bomberos
MADERA	BAJA	ALTA	ALTA	MUCHO BAJA	MUCHO BAJA	NULL	BAJA
ACERO	MUCHO BAJA	NULL	NULL	MUCHO ALTA	BAJA	BAJA	BAJA
HORMIGÓN	ALTA	NULL	NULL	BAJA	ALTA	ALTA	ALTA

Figura 1. Atributos de los materiales de construcción (sin protección) bajo fuego (Jacobs, 2007).

El concreto es incombustible y tiene una tasa baja de aumento de temperatura a lo largo de su sección transversal, por lo que en la mayoría de los sistemas estructurales el material puede usarse sin ningún tipo de protección adicional contra el fuego.

En este artículo, hay la oportunidad de presentar y discutir algunos temas esenciales sobre la acción del fuego en las estructuras de concreto y los posibles efectos nocivos de las altas temperaturas en el material de concreto.

2. ASPECTOS DEL CONCRETO BAJO FUEGO

2.1 El fuego, el concreto y el incendio.

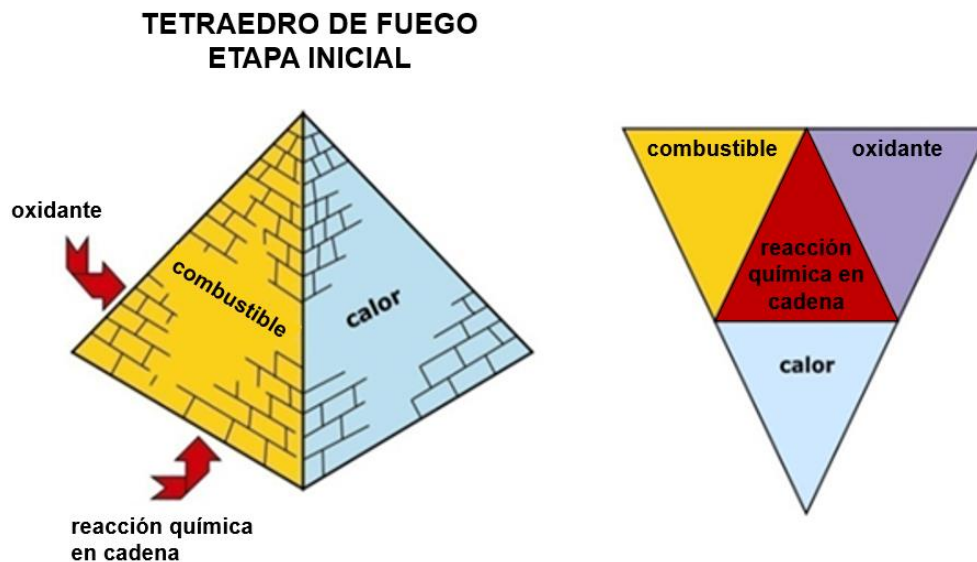
En Brasil, la ABNT NBR 13860: 1997 presenta la siguiente definición: "El fuego es el proceso de combustión caracterizado por la emisión de calor y luz". Sin embargo, de acuerdo con Seito et al. (2008), a pesar de los grandes avances en la ciencia del fuego, todavía no existe un consenso global para definir el fuego en las principales normas internacionales vigentes.

Seito et al. (2008) aclaran que inicialmente se formuló una teoría conocida como el Triángulo del Fuego, que estaba formada por tres elementos fundamentales: el combustible, el oxidante (oxígeno) y el calor. Según esta teoría, la eliminación de cualquiera de estos elementos del triángulo sería directamente responsable de la extinción del fuego.

Por otro lado, con el descubrimiento del agente extintor "halon", la teoría fue reformulada, siendo conocida hoy como Tetraedro del Fuego (Figura 2). A su vez, el Tetraedro del Fuego se compone de los siguientes elementos: calor, oxidante, combustible y la reacción en cadena.

El calor es el elemento utilizado para iniciar un incendio, mantener y aumentar su propagación.

El oxidante (oxígeno) es necesario para la combustión y está presente en el aire que nos rodea. El combustible es el elemento propagador del fuego y puede ser sólido, líquido o gaseoso. La reacción en cadena hace que el proceso de combustión sea autosostenible. Básicamente, el calor irradiado por las llamas golpea el combustible y se descompone en partículas más pequeñas, que se combinan con oxígeno y se queman, irradiando calor de vuelta al combustible, formando así un ciclo constante (autosostenible).



El concreto (visto exclusivamente como material) es reconocido por su buena resistencia a temperaturas elevadas debido a sus características térmicas, tales como: incombustibilidad y baja conductividad térmica. Además, el concreto no emite gases tóxicos cuando se calienta y los elementos tienen mayor masa y volumen en comparación con otros materiales como, por ejemplo, los elementos de estructuras metálicas y de madera, o sea, potencialmente resisten por más tiempo.

Puede afirmarse, por lo tanto, que el concreto no es un elemento fundamental del Tetraedro del Fuego porque no es un combustible sólido. En caso de incendio, el concreto sufre las consecuencias del fuego originado en cualquier material inflamable, ya sea sólido, líquido o gaseoso. En general, en edificios comerciales y residenciales, esta carga inflamable proviene de materiales sólidos de base celulósica como puertas, muebles, suministros de oficina, alfombras, cortinas, etc.

De forma general, varios estudios apuntan conservadoramente que una porción más expuesta de concreto pierde aproximadamente el 25% de su resistencia mecánica a la compresión original cuando se calienta a temperaturas de alrededor de 300°C y aproximadamente el 75% cuando esta temperatura alcanza un nivel de 600°C en el interior.

Además de la reducción de la resistencia, investigación precursora desarrollada por Abrams (1971) y Neville (1981) indicaron que los concretos considerados normales sufrieron altos gradientes térmicos cuando se expusieron al fuego y había una fuerte tendencia a que las capas de la superficie caliente se separaran de las capas más frías dentro del elemento. Este tipo de desprendimiento superficial se conoce mundialmente como *spalling*.

El fuego generalmente comienza en pequeñas proporciones y su crecimiento depende del primer elemento encendido, de las características de comportamiento al fuego de los materiales en la vecindad de este elemento encendido y su distribución en el medio ambiente (Seito et al., 2008).

Costa y Silva (2003) y Costa (2008) describen que, en general, la curva representativa de la variación de temperatura en un incendio real se caracteriza por dos ramas bien definidas (una ascendente y una descendente) con **tres etapas** delimitadas por dos puntos (Figura 3) ignición, flashover y temperatura máxima. Estas **tres etapas** se explican a continuación.

- **Ignición:** etapa de calentamiento al comienzo del incendio, con aumento gradual de la temperatura, con una influencia mínima en el ambiente alrededor y sin riesgo para la vida humana o el patrimonio por colapso estructural. Esta etapa también se conoce como pre-flashover y termina en el instante conocido como flashover.
- **Flashover:** etapa caracterizada por un cambio repentino y acelerado en el crecimiento de la temperatura. En esta etapa, todo el material combustible en el compartimento (ambiente) entra en combustión. La temperatura de los gases calientes es superior a 300°C hasta subir a temperaturas superiores a 1000 ° C.
- **Enfriamiento:** etapa que representa la reducción gradual de la temperatura de los gases en el ambiente, luego de la extinción completa del material combustible presente en el compartimento. Sin nuevas cargas de fuego para alimentar las llamas, comienza la pérdida de calor, o sea, el enfriamiento gradual de la estructura.

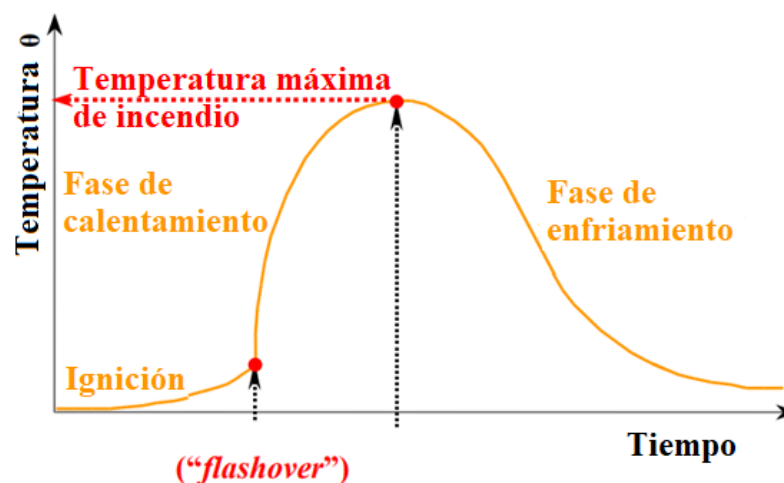


Figura 3. Etapas principales de un incendio real (Costa & Silva, 2003).

En general, la simulación de fuego real o natural en una estructura es bastante compleja y puede ser bastante única, ya que cada fuego tiene sus particularidades, que dependen directamente de la velocidad de calentamiento, la temperatura máxima alcanzada y la duración del evento.

Considerando esta situación, Costa y Silva (2003, 2006) observaron que, para facilitar la determinación de la acción térmica en las estructuras, modelos matemáticos de incendios han sido formulados para describir la variación de temperatura del compartimiento como una función del tiempo de fuego.

La relación temperatura-tiempo, en estos casos específicos, puede representarse mediante "curvas de temperatura-tiempo" o "curvas de fuego", que son estandarizadas y conocidas popularmente como la "curva estándar de fuego".

2.2 Curvas estándar de simulación de fuego

Curvas estándar son adoptadas en ensayos experimentales y de laboratorio de resistencia al fuego, con el fin de estandarizar los ensayos y proporcionar suficiente apoyo para analizar y comparar los resultados obtenidos, una vez que la simulación de fuego fue estandarizada (Costa e Silva, 2006). En esta perspectiva, cuando el tiempo de resistencia mínimo de los elementos estructurales se determina mediante la curva de fuego estándar, se denomina Tiempo Requerido de Resistencia al Fuego o simplemente por el acrónimo **TRRF** (en Brasil, especificado según la ABNT NBR 14432: 2001).

TRRF es un período mínimo estándar que supone que una estructura dada mantendrá sus funciones de rendimiento durante un escenario de incendio simulado por una curva estándar.

En general, este período se expresa en intervalos de 30 minutos con valores predeterminados, dependiendo de varios factores (*fib*, 2007): tipo de ocupación / uso, altura y número de pisos del edificio, cantidad de personas para evacuación, dimensiones de los compartimentos, rutas de escape / salidas de emergencia y sistemas de protección disponibles (extintores, duchas automáticas, entre otros).

La Figura 4 presenta los perfiles de temperaturas que simulan tres escenarios de incendio estándar que se utilizan comúnmente en estudios experimentales, como sigue: (a) el escenario de incendio dentro de un túnel; (b) incendio con origen en materiales a base de hidrocarburos (combustibles) y (c) incendio en edificaciones con origen en materiales a base de celulosa (madera).

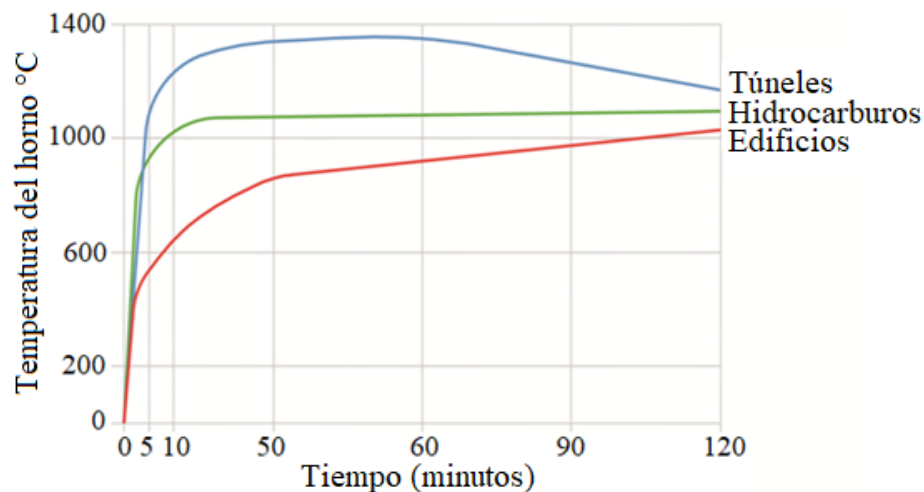


Figura 4. Curvas "idealizadas" para tres escenarios de simulación de incendios: túneles, hidrocarburos y edificios - materiales celulósicos - hasta 120 minutos (The Concrete Center, 2004).

Las tres curvas idealizadas y estandarizadas más utilizadas en el campo técnico y también utilizadas en estudios experimentales que involucran simulaciones de escenarios de incendio causadas por materiales basados en celulosa en elementos de concreto son las curvas: ISO 834, ASTM E119 y JIS A 1304 (Phan, 1996). Estas curvas son muy similares y se pueden ver superpuestas en la Figura 5. Las curvas estándar relacionadas con los túneles y los hidrocarburos no se tratarán en este artículo y se pueden consultar en Leonardo Da Vinci Pilot Project: Handbook 5 (2005).

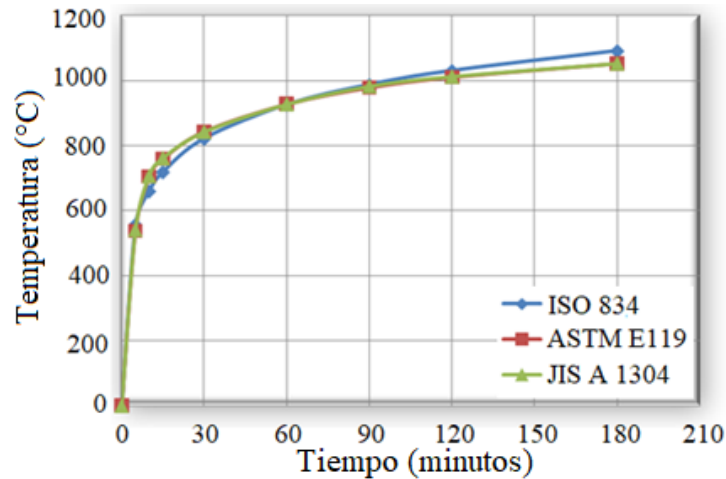


Figura 5. Curvas de incendio estándar (adaptadas de Phan, 1996).

La curva ISO 834 es una de las más utilizadas en estudios experimentales internacionales, siendo también adoptado en Brasil - transcrito en ABNT NBR 5628: 2001. Esta curva especifica que la muestra debe someterse a un aumento de temperatura dentro del horno, dada por la siguiente ecuación logarítmica (Ecuación 1):

$$\theta - \theta_0 = 345 \log_{10} 8(t + 1) \quad (\text{Ecuación 1})$$

En que:

t = tiempo, expresado en minutos (min);

θ = temperatura interior del horno en el tiempo t, expresado en grados Celsius ($^{\circ}$ C);

θ_0 = temperatura interior inicial del horno, expresado en grados Celsius ($^{\circ}$ C);

Otras curvas estándar para materiales inflamables (ASTM E1549, RWS y RABT) se han modelado en función de la severidad del fuego y se han recomendado internacionalmente para situaciones especiales (Costa, 2008). También hay curvas de fuego llamadas "curvas naturales", parametrizadas por la cantidad de material combustible (carga de fuego), el grado de ventilación y por las características térmicas y físicas de los materiales de compartimentación. Estas curvas son modelos simplificados del fuego real y no se tratarán en este texto y se pueden consultar en Leonardo Da Vinci Pilot Project: Handbook 5 (2005).

2.3 Distribución de temperatura dentro del concreto.

El calor es la energía que se transfiere de un sistema a otro gracias a una diferencia (gradiente) de temperatura. Básicamente, hay tres mecanismos clásicos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

En la conducción, la energía térmica se transfiere a través de interacciones entre átomos o moléculas, aunque no hay transporte de estos átomos o moléculas, solo el desplazamiento de energía. En convección, la energía se transporta en forma de calor a través del transporte directo de masa. En la radiación, la energía térmica se transporta a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas que se mueven a la velocidad de la luz.

En caso de incendio, hay una combinación de estos tres mecanismos de transferencia de calor, sin embargo, dentro de la masa de concreto hay un predominio del flujo de calor por **conducción**. En este contexto, el cálculo del desarrollo de un campo de temperatura en la sección transversal de un elemento de concreto estructural expuesto al fuego implica resolver la clásica ecuación diferencial de Fourier (Ecuación 2):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q = \rho \cdot c_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 2})$$

En que:

λ_{θ} : es la conductividad térmica del material (W/m °C);

$\rho \cdot c$: é a calor específico volumétrico do material (producto de masa específica y calor específico absoluto) (J / kg °C);

x, y e z: las coordenadas cartesianas del sistema tridimensional;

Q: es la tasa de calor interna generada en el material;

$\partial \theta$: es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor;

t: tiempo (s).

La generación interna de calor Q puede considerarse 0 (cero) para materiales no combustibles (como el concreto). Las condiciones de contorno (en la superficie del elemento) se expresan en términos de ecuaciones de flujo de calor y las propiedades térmicas del material dependen del tipo y la cantidad de insumos empleados en la dosificación del concreto (Leonardo Da Vinci Pilot Project: Handobook 5, 2005)

Para ejemplificar el comportamiento de la evolución del campo de temperatura en función del tiempo en un elemento concreto, se presenta el estudio de simulación por ordenador realizada por Ongah, Mendis y Sanjayan (2002) en muros de concreto de alta resistencia (Figura 6) con solo un lado expuesto al fuego. El gráfico indica el gradiente térmico significativo dentro del material (concreto) de acuerdo con un modelo de flujo de calor que simula numéricamente el escenario del incendio.

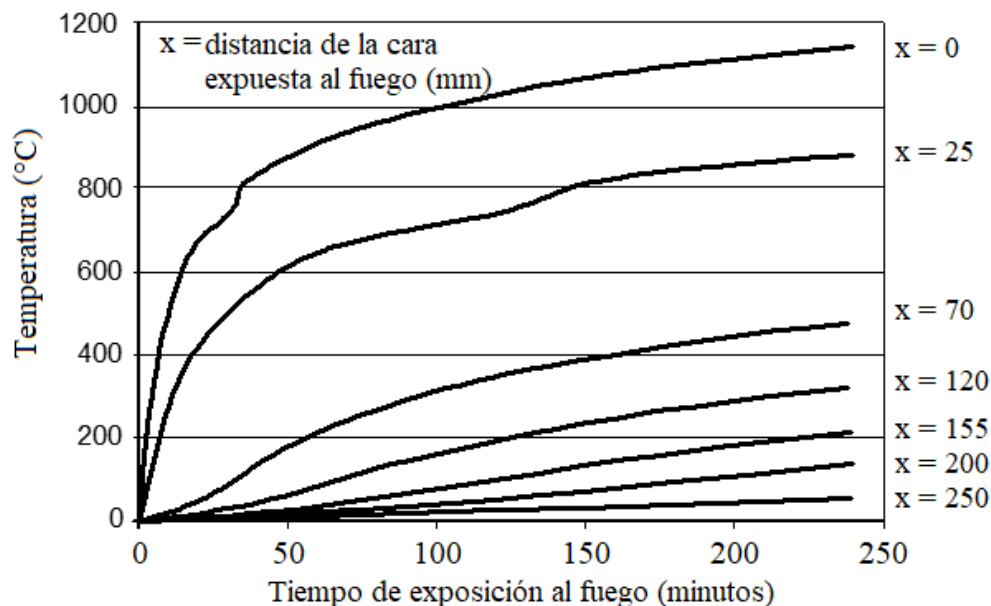


Figura 6. Evolución del campo de temperatura en un muro de concreto de alta resistencia en función del tiempo de exposición al fuego. (Ongah, Mendis & Sanjayan, 2002).

Otra forma de visualizar la evolución de la temperatura en el interior de un elemento de concreto, prescrita por los principales códigos internacionales, se puede ver en la Figura 7. En este caso, se presentan las curvas instantáneas de tiempos estandarizados en función de la temperatura y la profundidad de la superficie expuesta al fuego, modelo de presentación muy común adoptado por investigadores y en los códigos de varios países.

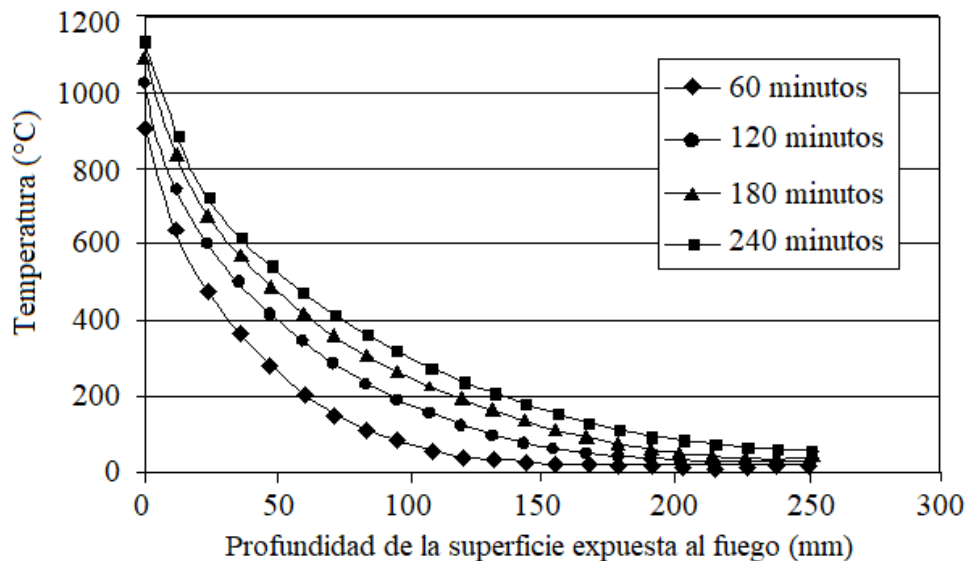


Figura 7. Distribución de temperatura en función de la distancia de superficie expuesta al fuego y el tiempo de exposición al fuego, calculado por modelo numérico (Ongah, Mendis & Sanjayan, 2002).

2.4 Alteraciones en la microestructura del concreto bajo altas temperaturas

Considerase muy complejo el análisis preciso del comportamiento de los cambios en la microestructura de un concreto, ya que cada concreto tiene su singularidad debido a las varias alternativas de insumos y adiciones disponibles, así como al uso de diferentes metodologías de dosificación. También cabe destacar que, a altas temperaturas, la anisotropía y heterogeneidad del material concreto suele ser más evidente.

Obviamente, algunas reacciones son más evidentes en vista de los conocimientos previos de los aspectos litológicos de los agregados, adiciones y del tipo de cemento utilizado en la dosificación del concreto. En cuanto a la naturaleza litológica específica del agregado, la Figura 8 muestra la marcada diferencia en el comportamiento (estabilidad térmica) de varios agregados en función del aumento de temperatura.

En el contexto de la microestructura, Taylor (1990) menciona que, debido a su baja conductividad térmica y alto calor específico, el concreto brinda una buena protección al acero en situaciones de incendio, sin embargo, puede sufrir daños severos debido a las acciones térmicas que dañan principalmente la pasta de cemento. Destaca que, a bajas temperaturas, la pasta de cemento puede expandirse cuando se calienta, pero a partir de 300°C se produce una contracción asociada con la pérdida de agua. En esta etapa, los agregados continúan expandiéndose, y las tensiones internas resultantes pueden conducir a la pérdida de resistencia, agrietamiento y desprendimiento superficial. Algunos fenómenos son más explícitos, los elementos de cuarzo, por ejemplo, se expanden bruscamente a 573 ° C debido a una transformación polimórfica de cristalización y la calcita se contrae a partir de 900 ° C debido a su descomposición generalizada.

Taylor (1990) también describe los efectos térmicos sobre la pasta de cemento, y señala que: por debajo de 500°C, si ocurre principalmente la carbonatación y la dilatación de los poros de la matriz; entre 450 y 550°C, la descomposición de C-S-H, y a 600°C, la descomposición de CaCO₃, proporcionando CaO, que eventualmente puede rehidratarse durante la fase de enfriamiento.

Específicamente con respecto al papel del agua, Kalifa et al. (2000) señalan que el exceso de agua contenida en las pastas saturadas de cemento Portland contribuye a la formación de gradientes significativos de presión en la red de poros de concreto durante la transferencia de masa (evaporación del agua) y, en consecuencia, al aumento de las grietas debido a contracción de la pasta.

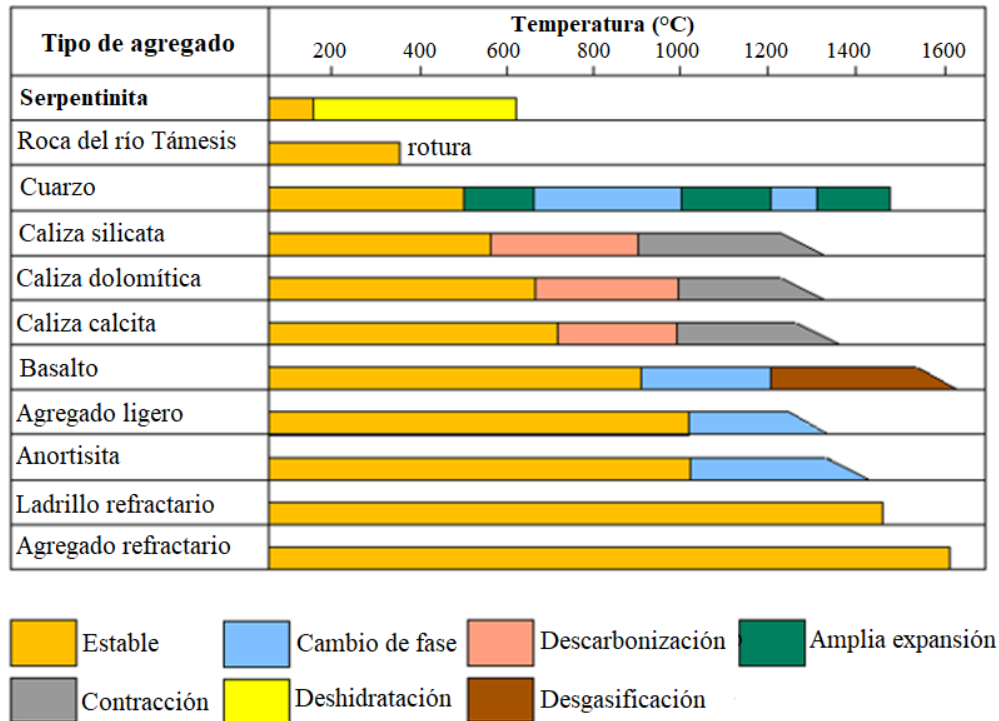


Figura 8. Comportamiento de varios agregados durante el calentamiento (*fib*, 2007).

En este sentido, a pesar de los importantes cambios fisicoquímicos que ocurren en la pasta de cemento, así como el papel del agua en la mezcla, *fib* (2007) señala que a altas temperaturas son los agregados los que realmente pueden gobernar el comportamiento térmico del concreto cuando esto se considera exclusivamente como un material compuesto.

Las principales razones para formar esta teoría se basan en las siguientes consideraciones:

- los agregados generalmente ocupan un volumen significativo de la masa del concreto entre 60% y 80% em volumen de un concreto normal;
- las variaciones en las propiedades de los agregados durante el calentamiento pueden promover efecto considerable en el rendimiento de concreto a temperaturas elevadas. La conductividad térmica del concreto, por ejemplo, es muy influenciada por la naturaleza litológica del agregado;
- cada tipo de agregado reacciona de manera diferente al calor. El factor principal en el comportamiento del concreto calentado es la estabilidad química y física del agregado;
- Los agregados también son responsables de restringir cualquier expansión y contracción de la pasta de cemento durante el calentamiento.

En general, el proceso fisicoquímico del concreto, que involucra la interacción entre agregados y pasta de cemento, en una situación de incendio, puede simplificarse como se muestra en la Figura 9.

¿Qué sucede con el aumento de temperatura?

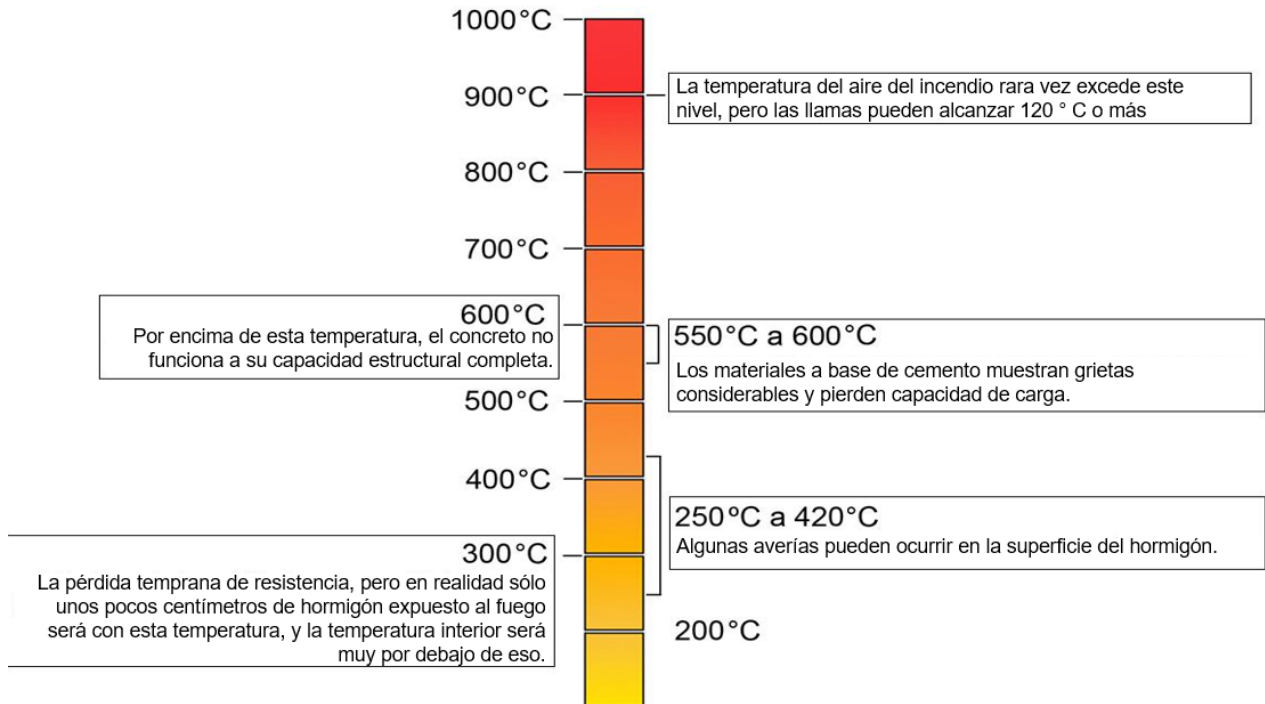


Figura 9. Proceso físico-químico del concreto en situación de incendio (Jacobs, 2007).

En cuanto al concreto armado en sí, Cánovas (1988) apud Costa (2008) señala que después de 100°C, la reducción de la adhesión entre barras de acero y concreto puede ocurrir debido al aumento y la duración del calentamiento, y que, por encima de 600°C, puede haber una pérdida significativa de adherencia. Es de destacar que los cambios microestructurales en las barras de acero no son parte del alcance de este artículo, pero se pueden consultar en otras referencias, a saber: Holmes et al. (1982), Cabrita Neves, Rodrigues y Loureiro (1996) y Purkiss (1996).

2.5 Desprendimiento de concreto a alta temperatura (*spalling*)

El término *spalling* es internacionalmente conocido y estandarizado en los principales códigos e investigaciones internacionales. El fenómeno físico conocido como *spalling* (Figura 10) se puede definir como siendo tipo explosivo, y algunos incluso lo llaman de violento / explosivo. Corresponde al desprendimiento de capas o pedazos de la superficie de concreto o de un elemento estructural cuando se expone a temperaturas elevadas y rápidas tasas de calentamiento, ambos caracterizados por un escenario de incendio (*fib*, 2007).



Figura 10. Ejemplo de *spalling* explosivo en pilares de concreto de alta resistencia. $f_{ck} = 83$ MPa (Kodur et al., 2005).

Debe aclararse, sin embargo, que el *spalling* no es un mecanismo de fallo o colapso estructural del elemento. El fenómeno puede ser leve, normal o severo y, como resultado, puede o no conducir a una pérdida rápida de la sección transversal, lo que podría desencadenar un mecanismo de colapso estructural, como las fallas tradicionales causadas por compresión, flexión o cizallamiento.

El alcance, la gravedad y la naturaleza de la ocurrencia de *spalling* pueden ser muy variable e impredecible. El fenómeno puede ser insignificante en cantidad y, en consecuencia, tras la aparición de pequeños vacíos superficiales; sin embargo, puede ser grave y comprometer la resistencia al fuego del elemento debido a las grandes porciones desplazamiento concreto, la exposición de la armadura y la reducción de su capacidad estructural debido a su sección transversal reducida.

Con el fin de simplificar y clasificar el fenómeno *spalling*, la *fib* (2007) propuso la agrupación de esta en seis categorías, a saber¹:

- *spalling* del agregado;
- *spalling* explosivo;
- *spalling* superficial;
- *spalling* por delaminación;
- *spalling* de borde y
- *spalling* post enfriamiento.

De todas las categorías, el *spalling* tipo explosivo se considera el más grave y severo en una situación de incendio. Como se discutió en *fib* (2007), este tipo de *spalling* puede ocasionar roturas explosivas y posteriores de capas de concreto, generalmente alcanzando espesores entre 25 y 100 mm, dependiendo de cada caso específico.

Según Khoury y Anderberg (2000) y *fib* (2007), la aparición de cada tipo de *spalling* está influenciada por varios factores, como la resistencia, la edad, el tipo y el tamaño de los agregados, el contenido de humedad y la permeabilidad al vapor de agua del material; la temperatura máxima y la velocidad de calentamiento de las acciones térmicas; la forma y el tamaño de la sección transversal, la presencia de grietas, la velocidad del acero, la disposición (configuración) del refuerzo, la presencia de fibras de polipropileno y la intensidad de carga del elemento estructural. La influencia de estos factores se puede observar brevemente en la Tabla 1.

¹ Los términos de las seis categorías propuestas por *fib* (2017) fueron interpretados y traducidos por los autores de este artículo.

Tabla 1. Diferentes categorías de *spalling* y sus respectivos agentes influyentes (*fib*, 2007).

Clasificación de <i>spalling</i>	Tiempo de ocurrencia (probabilística)	Naturaleza	Aspectos sonoros	Gravedad	Grandes influencias*
Agregado	entre 7 y 30 minutos	agrietamiento / grietas	pequeños estalos (tipo palomitas de maíz) paletas pequeñas (tipo palomitas de maíz)	superficial	H, A, S, D W
Borde	entre 30 y 90 minutos	no violento	ninguno	puede ser severo	T, A, Ft, R
Superficial	entre 7 y 30 minutos	violento	tipo de ocurrencia de grietas / crujidos	puede ser severo	H, W, P, Ft
Explosivo	entre 7 y 30 minutos	violento	flequillo / fuertes explosiones	severo	H, A, S, Fs, G, L, O, P, Q, R, S, W, Z
Delaminación	cuando el concreto se vuelve friable (pierde resistencia)	no violento	ninguno	puede ser severo	T, Fs, L, Q, R
Post enfriamiento	durante y después del enfriamiento por absorción de humedad	no violento	ninguno	puede ser severo	T, Fs, L, Q, R, W1, AT

* Los acrónimos utilizados en el documento original se conservaron (*fib*, 2007), de acuerdo con el siguiente título para evitar confusiones con los acrónimos ya utilizados en el idioma nacional (de Brasil).

Subtítulo:

A= expansión térmica del agregado, D = difusividad térmica del agregado, Fs = esfuerzo cortante de concreto, Ft = tensión de tracción de concreto, G = edad del concreto, H = velocidad de calentamiento, L = carga/restricción, O = perfil de calentamiento, AT = tipo de agregado, P = permeabilidad, Q = forma transversal (geometría), R = refuerzo, S = tamaño del agregado, T = temperatura máxima, W = contenido de humedad, Z = tamaño de la sección transversal, W1 = absorción de humedad.

2.5.1 Spalling en concreto de alta resistencia

Cuando se trata de concreto de alta resistencia sometido a altas temperaturas, se presta especial atención al fenómeno de desprendimiento explosivo. Este tipo de desprendimiento se origina teóricamente por la formación de presión de vapor de agua en los poros dentro de una masa de concreto durante su calentamiento.

Según Kodur et al. (2005), el concreto de alta resistencia es más susceptible a esta formación de presión de vapor de agua, principalmente debido a su baja permeabilidad al vapor de agua en comparación con el concreto de resistencia normal.

Sin embargo, la teoría generalizada en la literatura internacional se basa en los estudios precursores de Shorter & Harmanthy (1965) apud *fib* (2007) y conocido internacionalmente como “moisture clog model” o modelo de obstrucción de humedad. Según esta teoría, la presión de vapor de agua extremadamente alta dentro de la masa de concreto generada durante la exposición al fuego no sale al ambiente debido a la baja permeabilidad del concreto de alta resistencia.

Según Kodur et al. (2005), a 300°C esta presión puede alcanzar valores iguales o superiores a

8MPa, siendo alta para ser resistida por los concretos de alta resistencia que tienen una resistencia a la tracción, en general, del orden de 5MPa a 7MPa.

De acuerdo con la teoría formalizada por Shorter & Harmanthy (1965) apud *fib* (2007), una extensa investigación realizada por Phan (2002) demostró que la ocurrencia de *spalling* explosivo en realidad estaba relacionada con la incapacidad de ciertos concretos de alta resistencia para fugas de presión del agua libre y el agua químicamente combinada que se vaporiza con el aumento de la temperatura dentro de la masa de concreto.

En sus experimentos, Phan (2002) observó que se puede concebir una alternativa para minimizar los efectos de la formación de presión interna sobre el concreto mediante la introducción de fibras de polipropileno en mezclas de concreto, donde este hecho se ha demostrado en una extensa investigación que involucra probetas de concreto de alta resistencia. Fue posible caracterizar el comportamiento del concreto de alta resistencia con respecto a los aspectos de formación de presión interna, siendo considerado equivalente al concreto de resistencia normal cuando a altas temperaturas, simplemente por la introducción de fibras de polipropileno.

Este hecho se verificó al estudiar la presión de poro (presión de poro) ejercida sobre estos dos tipos de concreto (normal y alta resistencia), proveniente de las altas temperaturas que se pueden alcanzar en un incendio, como se muestra en la Figura 11 (Phan, 2002).

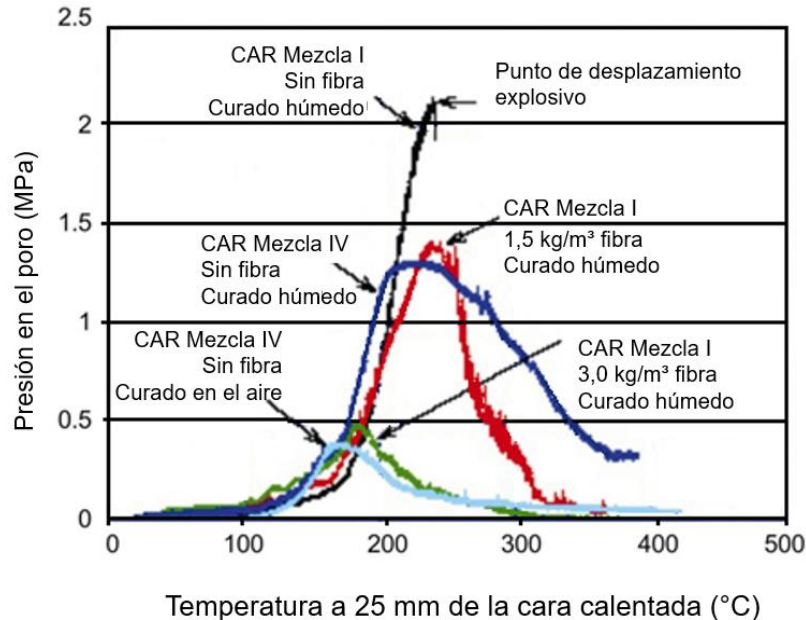


Figura 11. Presión equivalente de ambos tipos de concreto (CN: normal y CAR: alta resistencia) con la introducción de fibras de polipropileno en concreto de alta resistencia (a altas temperaturas) (Phan, 2002).

Sin embargo, Phan (2002) señaló que existen inconsistencias significativas cuando se asocian solo con la formación de presión de poro con el fenómeno de *spalling* explosivo, principalmente porque hay otros factores fundamentales que pueden influir en los programas experimentales en general. Solo la introducción de fibras de polipropileno no garantiza necesariamente la integridad del concreto a altas temperaturas, y puede haber otros agentes influyentes, como el tipo y las dimensiones de la muestra en sí (probetas o elementos estructurales).

2.5.1.1 O El efecto de la presencia de refuerzo (concreto armado)

Los estudios experimentales realizados por el profesor Ph.D. Venkatesh Kodur, mientras estuvo vinculado al Consejo Nacional de Investigación NRC-CNRC de Canadá, tuvieron un impacto significativo en la investigación y el desarrollo, especialmente del concreto de alta resistencia en

condiciones de incendio.

Kodur et al. (2000) ha hecho pruebas en columnas bajo carga de concreto normal y de alta resistencia con una sección transversal de 305 mm x 305 mm y una altura de 3810 mm. Las columnas normales de concreto eran de 34MPa y los de alta resistencia de 83MPa, ambos a los 28 días de edad.

En un extenso programa experimental, Kodur et al. (2000) destacó algunas pautas innovadoras que contienen elementos estructurales sometidos a pruebas de resistencia al fuego, lo que contribuyó considerablemente a un mejor rendimiento del concreto de alta resistencia en situación de incendio. Las pautas principales se basaron en los procedimientos adoptados para el confinamiento de pilares, como se discute a continuación.

La recomendación principal se refiere a la disposición (configuración) del refuerzo transversal (estribos) con un bloqueo (confinamiento) en forma de gancho a 135 ° en el borde del elemento y la reducción correspondiente en la separación del estribo, que es aproximadamente 0,75 veces do generalmente requerido para concreto normal. Las modificaciones propuestas por Kodur et al. (2000) y también resumido en Kodur et al. (2005) se puede ver en la Figura 12.

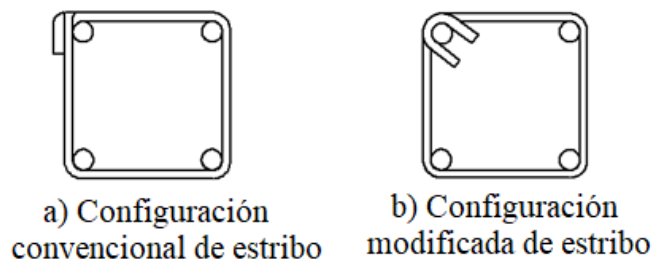


Figura 12. Configuración de refuerzo de sección transversal convencional (estribos) de un pilar de concreto de alta resistencia (a) y configuración modificada para mejor (b) (Kodur et al., 2005).

El resultado positivo de la propuesta de Kodur et al. (2005) es evidente al observar los dos elementos de concreto de alta resistencia de la Figura 13, después de los respectivos experimentos de verificación de resistencia al fuego realizados bajo las mismas condiciones de prueba y material. También es importante tener en cuenta que en estas muestras no hubo adición de fibras de polipropileno en la mezcla de concreto, solo la modificación en la disposición (configuración) del refuerzo (indicado en la Figura 12).

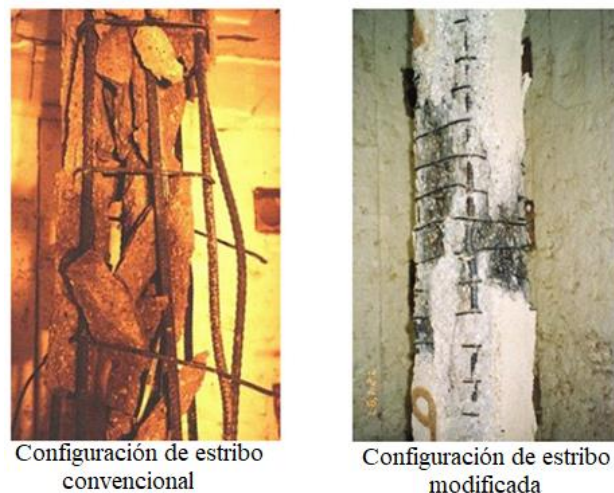


Figura 13. Resultados obtenidos después de la prueba de alta temperatura, (a) configuración convencional del refuerzo de columna de alta resistencia y (b) la configuración modificada para mejor (Kodur et al., 2005).

En resumen, según Kodur et al. (2005), el concreto de alta resistencia en realidad puede ser más susceptible al *spalling* en comparación con el concreto de resistencia normal, siendo este hecho más recurrente para resistencias por encima del nivel de 70 MPa. Sin embargo, este fenómeno puede minimizarse sustancialmente cuando se adoptan algunas pautas.

Como lo señalaron Kodur et al. (2000), el contenido de humedad del concreto, el tipo de agregado y el tamaño de la sección transversal del elemento también son relevantes, además de la propuesta previa de modificación en el refuerzo transversal. También señalan que, en la práctica, cuanto mayor es el contenido de humedad de la mezcla de concreto, más intenso y severo es el fenómeno de *spalling*.

2.5.1.2 El efecto de la edad.

Morita et al. (2002) realizaron una investigación exhaustiva para evaluar dos parámetros: (a) la influencia de la relación agua / cemento en la intensidad de *spalling* y (b) la influencia de diferentes configuraciones de refuerzo de elementos de concreto armado de alta resistencia para minimizar el efecto de *spalling*, con y sin la adición de fibras de polipropileno en la dosificación.

Para evaluar la influencia de la relación agua / cemento en la intensidad de *spalling*, se probaron varios tipos de elementos de concreto (con diferentes relaciones a/c), siempre a dos edades diferentes: dos meses y un año; sin variar las dimensiones del elemento estructural (70 cm x 70 cm x 140 cm) y el espesor de la cubierta del refuerzo (5 cm). La simulación de incendio se realizó de acuerdo con los requisitos de la curva estándar ISO 834 durante un período predeterminado de 180 minutos (3h).

En la Figura 14 es posible observar la considerable diferencia en función de la edad del elemento de concreto para valores equivalentes de relación agua / cemento (ejemplo para: $a/c = 0.375$ y $a/c = 0.449$).

El experimento realizado por Morita et al. (2002) parece contribuir a resaltar la medida en que la investigación realizada para evaluar el grado de *spalling* de elementos concretos en edades prematuras puede ser limitada, ya que la aparición de este tipo de fenómeno depende significativamente del factor tiempo (edad de la muestra).

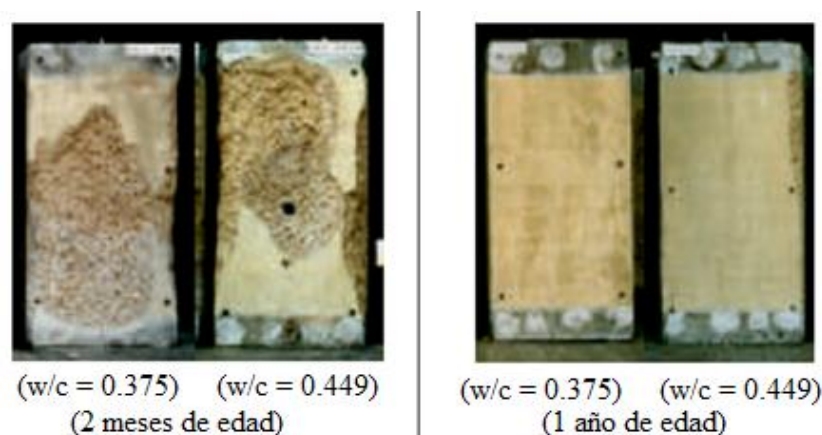


Figura 14. Pilares de concreto armado después del experimento de simulación de incendio (180 minutos): efecto de la relación agua/cemento y edad sobre el fenómeno de *spalling*, sección transversal lateral cuadrada 70 cm (Morita et al., 2002).

En Brasil (Britez, 2011) llevó a cabo un experimento con una grande columna, prototipo de las columnas de concreto armado coloreado de alta resistencia del edificio e-Tower - récord mundial de resistencia en la época (Helene y Hartmann, 2003), con edad avanzada de ocho años.

Los resultados mostraron que el concreto de alta resistencia se comportó de manera íntegra y justa (Figura 15) frente al fuego, con el 95% de su área de sección transversal mantenida después del ensayo (solo el 5% fue efectivamente reducido por el efecto del *spalling*). Además, se encontró en

este experimento que el uso de pigmento a base de óxido de hierro (concreto coloreado) también actuó como un excelente indicador colorimétrico (termómetro natural), ayudando a evaluar la estructura posterior al incendio.

La columna (pilar) probado (f_{ck} de 140 MPa) tenía una sección transversal de 70 cm x 70 cm, 2 m de alto, promedio de 25 mm de espesor de cubierta al acero; y se probó con tres caras expuestas al fuego durante un período de 180 minutos (3 h), sin carga, con simulación de incendio caracterizada por la curva estándar de calentamiento ISO 834 en el Laboratorio de Seguridad contra Incendios de IPT en São Paulo.

Además de la edad avanzada, Britez (2011) señaló que otros factores pueden haber contribuido positivamente al buen rendimiento de la columna, como el tipo de agregado grueso utilizado en la dosificación del concreto original (basalto), así como el tamaño de la sección transversal y la configuración de refuerzo de la muestra.

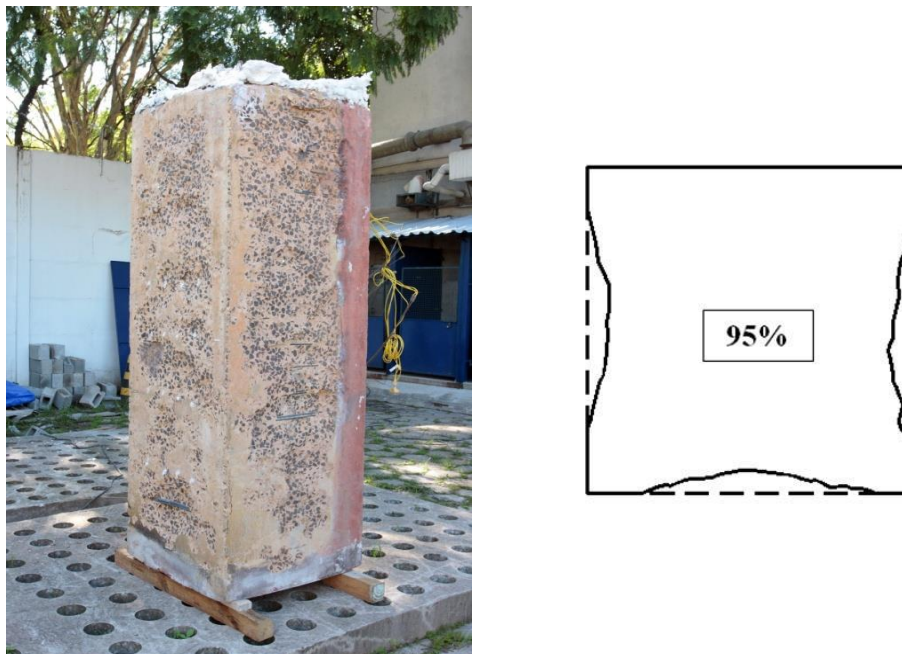


Figura 15. Integridad del pilar y detalles transversales conservados después de una prueba de 180 min (3 h) (que muestra la pequeña reducción de la sección transversal sufrida solo por el spalling) (Britez, 2011).

2.5.1.3 El efecto de la intensidad de carga.

Aunque importantes y estandarizadas, las pruebas realizadas en probetas (cúbicos o cilíndricos) e incluso en elementos estructurales grandes (columnas, vigas y losas), con incrementos de carga y restricciones, aún no son suficientes para las pruebas. Una simulación real del comportamiento del concreto cuando se inserta en un sistema estructural, donde se puede producir otros efectos durante un incendio, como dilataciones / estiramientos, deformaciones y desplazamientos generalizados de todos los elementos de concreto expuestos al fuego.

Por razones obvias asociadas con los costos involucrados y la complejidad de realizar este tipo de experimentos, no es una práctica común simular programas experimentales térmicos en un prototipo de edificio para la evaluación de elementos estructurales. Sin embargo, en septiembre de 2001 se realizó un ensayo muy ampliamente publicitado en el Centro de pruebas de edificios grandes de Cardington (LBTF). El edificio prototipo del proyecto Cardington tenía siete pisos, una altura total de 25,2 m y ocupaba un área de 675 m² distribuidos en compartimentos cuadrados de 7,5 m x 7,5 m, que en planta formaban un rectángulo con cuatro compartimentos en una dirección y tres en otro. Una perspectiva del prototipo de edificio de Cardington se puede ver en la Figura 16.

El edificio prototipo no tenía vigas y se caracterizaba por un sistema de construcción que consistía en pilares y losas planas y macizas, que tenían 25 cm de espesor, las columnas/pilares internos de sección transversal cuadrada de 40 cm x 40 cm y el pilar extremo cuadrado de 40 cm x 25 cm. Los pilares/columnas tenían un espesor de recubrimiento de 40 mm y se diseñaron con concreto de alta resistencia ($f_{ck} = 103\text{MPa}$ a los 28 días de edad), que contenía agregados de piedra caliza, adición de sílice y fibra de polipropileno de 2 kg por metro cúbico de concreto.



Figura 16. Perspectiva de la estructura prototipo de concreto armado diseñada para el experimento de simulación de fuego en Cardington (Chana & Price, 2003).

Según lo descrito por Chana & Price (2003), la simulación de incendios tuvo lugar en una región ocupada por cuatro compartimentos en un área total de 225 m^2 con una altura de 4,25 m (pie derecho) en la planta baja del edificio. Intencionalmente, se expuso un pilar interno en las cuatro caras y parte de su extremo parcialmente, como se observa en el plan de la Figura 17. El experimento también involucró aberturas de ventilación proyectadas en las paredes exteriores de los compartimentos para encender, así como la simulación de carga. Las losas se cargaron uniformemente con sacos de arena para una sobrecarga útil de $3.25\text{ kN} / \text{m}^2$ ($325\text{ kgf} / \text{m}^2$) y en la región del pilar se colocaron bolsas adicionales para simular una tensión axial de 925 kN (92.5 tf). El incendio fue simulado por la quema de material inflamable que consiste en paletas de madera, colocadas en los compartimentos para producir una carga térmica de $40\text{ kg} / \text{m}^2$ ($720\text{ MJ} / \text{m}^2$), compatible con una carga típica de incendio en oficinas comerciales.

Durante la simulación de fuego, en los primeros 10 minutos del experimento, se produjo un desprendimiento de pequeña intensidad, prácticamente superficial, caracterizado por un discreto sonido de estallido. Sin embargo, después de este período y durante otros 15 minutos, la intensidad fue mucho más alta, lo que indica un probable desprendimiento explosivo, que luego se encontró principalmente en las superficies de losa (techo) de los compartimentos en llamas ($f_{ck} = 74\text{ MPa}$). Después de 25 minutos, las ocurrencias de desprendimiento disminuyeron significativamente. El alcance y la gravedad de la aparición del fenómeno de desconchado después del experimento se pueden observar en la Figura 18.

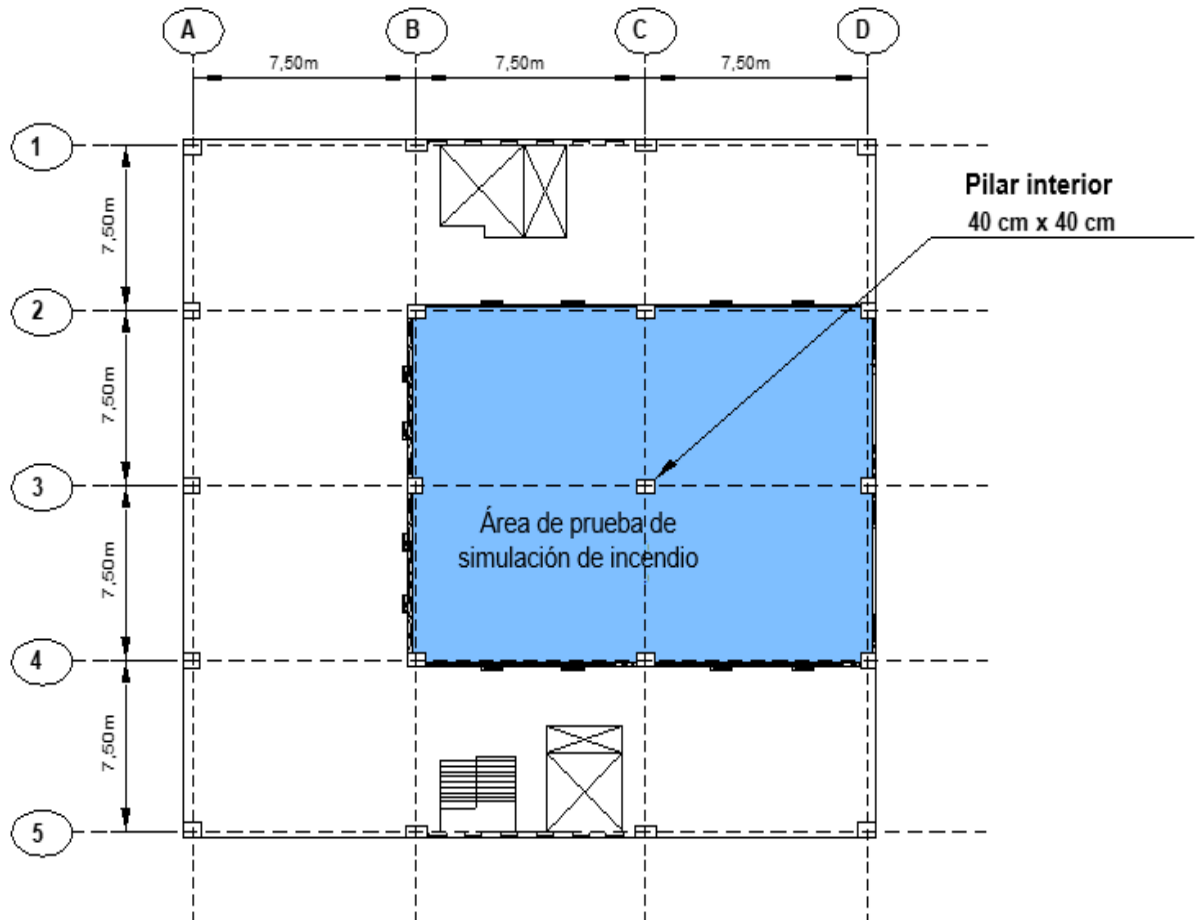


Figura 17. Plan prototipo de estructura de concreto armado que indica el área bajo simulación de fuego (Chana & Price, 2003).

El incendio fue simulado por la quema de material inflamable que consiste en paletas de madera, colocadas en los compartimentos para producir una carga térmica de 40 kg/m^2 (720 MJ/m^2), compatible con una carga típica de incendio en oficinas comerciales.

Durante la simulación de incendio, en los primeros 10 minutos del experimento, se produjo un *spalling* de pequeña intensidad, prácticamente superficial, caracterizado por un discreto sonido de estallido. Sin embargo, después de este período y durante otros 15 minutos, la intensidad fue mucho mayor, lo que indica un probable *spalling* explosivo, que luego se encontró principalmente en las superficies de losa (techo) de los compartimentos en llamas ($f_{ck} = 74 \text{ MPa}$). Después de 25 minutos, las ocurrencias de *spalling* disminuyeron significativamente. El alcance y la gravedad de la aparición del fenómeno de *spalling* después del experimento se pueden observar en la Figura 18.



Figura 18. Detalle de la extensión y severidad del *spalling* de la losa ($f_{ck} = 74$ MPa) después de la simulación de incendio. Resaltando, observe las condiciones de integridad del pilar de concreto de alta resistencia ($f_{ck} = 103$ MPa) (Chana & Price, 2003).

Con respecto al aspecto de integridad del concreto de alta resistencia, Chana y Price (2003) observaron que las columnas ($f_{ck} = 103$ MPa en la oportunidad de la prueba) se comportaron satisfactoriamente, con *spalling* de baja intensidad, pero insignificantes desde el punto de vista de la seguridad, y estabilidad estructural, incluso considerando los efectos de la carga, la unión, entre otros atributos normales de una estructura de concreto en estado de servicio. También agregaron que, en este caso específico, también puede haber habido una contribución positiva de la adición de fibras de polipropileno en la dosificación de concreto (en las columnas).

Los investigadores también concluyeron que la integridad estructural de las losas ($f_{ck} = 74$ MPa) se mantuvo a pesar del *spalling* generalizado y las flechas de hasta 7,8 cm, lo que no comprometió la seguridad, como se señaló, no se colapsaron las losas y todos continuaron soportando las cargas distribuido de 325kgf/m². En este contexto, es notable que en el caso de losas sólidas no se introdujeron fibras de polipropileno en la dosificación de concreto.

3. CONCLUSIONES

1. Se considera que el texto, en general, contribuye potencialmente a desmitificar algunas creencias y dudas sobre el fenómeno del *spalling*, una de las principales manifestaciones del material a altas temperaturas.
2. Dentro del foco de fuego caracterizado por materiales a base de celulosa, incluso de alta intensidad, en general, se puede concluir que una estructura de concreto armado se comporta mejor que la observada en probetas pequeñas, así como elementos estructurales de dimensiones más grandes se comportan mejor que los elementos estructurales pequeños, al igual que los elementos estructurales en entornos secos y envejecidos son más resistentes que los recién construidos y húmedos.
3. Aunque el escenario de una estructura de concreto quemada es muy sombrío y produce fuertes impresiones negativas, a la luz de la ingeniería, el problema puede ser más estético que estructural. Sin embargo, por supuesto, la estructura debe ser inspeccionada completa y detalladamente por un especialista calificado, basado en recursos técnicos y experimentales para caracterizar adecuadamente las propiedades residuales de la estructura

de concreto armado.

4. Es difícil imaginar, en principio, la decisión de demoler (puede ocurrir más debido a los disturbios sociales o la falta de seguro de propiedad) de una estructura de concreto armado que ha sido sometida a altas temperaturas debido a un incendio. Las intervenciones correctivas de rehabilitación para reparaciones y rehabilitación estructural son mucho más comunes y recurrentes, siempre que estén respaldadas por una experiencia técnica detallada, el consentimiento de las agencias públicas relacionadas y el interés del propietario del edificio.

4. REFERENCIAS

- Abrams, M. S. (1971), “*Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F*”. American Concrete Institute, Special Publication, V 25, p.33-58.
- American Concrete Institute (2008), *ACI 318-08: building code requirements for reinforced concrete*. Farmington Hills: ACI.
- American Concrete Institute (1989), *ACI 216R-89: guide for determining the fire endurance of concrete elements*. Farmington Hills: ACI.
- American Society for Testing and Materials (2007), *E 119-07: standard test methods for fire of building construction and materials*. West Conshohocken: ASTM.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997), *NBR 13860: glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001), *NBR 14432: exigência de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001), *NBR 5628: componentes construtivos estruturais: determinação da resistência ao fogo*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Britez, C. A. (2011), “*Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas*”. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo: USP, 252 f.
- Cabrita Neves, I.; Rodrigues, J. P. C.; Loureiro, A. P. (1996), “*Mechanical properties of reinforcing and prestressing steels after heating*”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8 (4), p.189-194, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1996\)8:4\(189\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1996)8:4(189))
- Chana, P.; Price, B. (2003), “*The Cardington fire test*”. *Concrete*, 37 (1), p. 28-33, Jan.
- Costa, C. N. (2008), “*Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio*”. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo: USP, 405 f.
- Costa, C. N.; Silva, V. P. (2003), “*Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio: métodos tabulares apresentados em normas internacionais*”. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 5, 2003, São Paulo.
- Costa, C. N.; Silva, V. P. (2006), “*Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio*”. In: Seminário Internacional NUTAU: Tecnologia de Durabilidade, São Paulo: NUTAU-USP.
- Costa, C. N.; Silva, V. P. (2004), “*Considerações sobre a segurança das estruturas de concreto em situação de incêndio*”. In: Seminário Internacional NUTAU: Demandas Sociais, Inovações Tecnológicas e a Cidade, 2004, São Paulo: NUTAU-USP. Disponível em: www.lmc.ep.usp.br/people/valdir/fire_safety/Nutau2004_concreto.pdf. Acesso em: nov. 2007.
- Costa, C. N.; Figueiredo, A. D.; Silva, V. P. (2002), “*Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas*”. In: Seminário Internacional NUTAU 2002. Sustentabilidade, Arquitetura e Desenho Urbano. São Paulo: NUTAU/FUPAM/FAUUSP.
- European Committee for Standardization (2003), *Eurocode 2: design of concrete structures: part 1-2: general rules: structural fire design*. prEN 1992-1-2. Brussels, Belgium, 106 p.
- Farny, J. A.; Panarese, W. C. (1994). “*High-strength concrete*”. Skokie, Ill.: Portland Cement Association, 53 p.

- (fib) Fédération Internationale Du Béton (2007), *“Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling – State-of-art report”*. Lausanne, fib. 97 p. (Bulletin d’information, 38).
- Helene, P.; Hartmann, C. T. (2003), *“HPCC in Brazilian office tower”*. Concrete International, v. 25, n. 12, p. 64-68, Dec. 2003.
- Holmes, M.; et al. (1982), *“The effects of elevated temperatures on the strength properties of reinforcing and prestressing steels”*. Structural Engineer, v. 60B, p. 7-13.
- Jacobs, J. -P. (2007), *“Comprehensive fire protection and safety with concrete”*. Brussels: European Concrete Platform. 30p. Disponível em: http://www.britishprecast.org/publications/documents/06-Fire_brochure-3004071.pdf. Acesso em: 22 Jun. 2011.
- Kalifa, P.; Menneteau, F.-D.; Quenard, D. (2000), *“Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures”*. Cement and Concrete Research, 30 (12), [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00384-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00384-7)
- Khoury, G. A.; Anderberg, Y. (2000), *“Concrete spalling review”*. [S.l.]: FSD, 2000. 60 p. Report submitted to the Swedish National Road Administration.
- Kodur, V. K. R.; et al. (2000), *“Experimental studies on the fire endurance of high-strength concrete columns”*. Canada: IRC/NRC, 146p. (NCR-CNRC Internal Report 819).
- Kodur, V. K. R.; et al. (2005), *“Guidelines for fire resistance design of high-strength concrete columns”*. Ottawa, Ontário, Canadá: IRC/NRC. (Report NRCC-47729). Disponível em: <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/fulltext/nrcc47729/>. Acesso em: nov. 2007.
- Leonardo Da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007 (2005), *“Handbook 5: design of buildings for the fire situation”*. Luxembourg: European Commission. Implementation of Eurocodes.
- Morita, T.; et al. (2002), *“An estimation method for fire resistance of reinforced concrete elements considering spalling”*. Proceedings of the 1st Fib Congress. p. 119-128.
- Neville, A. M. (1981), *“Properties of concrete”*. 3rd ed. London; Marshfield, Mass.: Pitman. 779 p.
- Ongah, R.; Mendis, P. A.; Sanjayan, J. G. (2002), *“Fire performance of high strength reinforced concrete walls”*. In: Proceedings of the Australasian Conference On The Mechanics Of Structures And Materials, 17, Gold Coast, Austrália. Lisse: Balkema, p. 199-204. Disponível em: http://www.civenv.unimelb.edu.au/aptes/publications/Fire-HSC_walls.pdf. Acesso em: nov. 2007.
- Phan, L. T. (2002), *“High-strength concrete at high temperature: an overview”*. In: Building and fire research laboratory. Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology, Disponível em: <http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build02/PDF/b02171.pdf>. Acesso em: nov. 2007.
- Phan, L. T. (1996), *“Fire performance of high-strength concrete: a report of the state-of-the-art”*. In: Building and fire research laboratory. Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology, NISTIR 5934. Disponível: <http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build96/art075.html>. Acesso em: nov. 2007.
- Purkiss, J. A. (1996), *“Fire safety engineering design of structures”*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 369 p.
- Seito, A I.; et al. (2008), *“A segurança contra incêndio no Brasil”*. São Paulo: Projeto. 496 p.
- Taylor, H. F. W. (1990), *“Cement chemistry”*. London: Academic Press, 475 p.
- The Concrete Centre (2004), *“Concrete and fire: using concrete to achieve safe, efficient buildings and structures”*. Camberley, Surrey, England. Disponível em: <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/DataBase/References/Concrete%20&%20Fire%203557%20lo%20res.pdf>. Acesso em: nov. 2007.