

Comportamiento de las estructuras ante el fuego Y humos de combustión

Un enfoque para suscripción
y atención del reclamo

RISK AND CLAIM ADVISOR

EN ESTE NUMERO:

COMPORTAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS ANTE EL FUEGO Y HUMOS DE COMBUSTION

UN ENFOQUE PARA SUSCRIPCION Y ATENCION DEL RECLAMO

El Comportamiento de las Estructuras Sólidas ante el Fuego Comportamiento de humos de Combustión

La incombustibilidad y su elevada resistencia al fuego se traducen en que el **hormigón** proporciona una seguridad bastante aceptable, aun cuando dependerá también tal resistencia de las temperaturas alcanzadas (originadas en los elementos que entran en combustión) y la duración del proceso de agotamiento de tales materiales. Así, para tener claridad de la resistencia es menester conocer las principales variables en los componentes constructivos principales en las edificaciones, independientemente de su uso, pues es común encontrar diversos materiales que integran los componentes estructurales.

Ahora bien, cuando desde el punto de vista de suscripción efectuamos la aceptación de un riesgo de incendio sobre un edificio (naturalmente incluyendo su contenido, que es lo más común), adelantamos un proceso de reconocimiento (Inspección) que permite identificar (o cuando menos, así debería ser), las condiciones bajo las cuales el Asegurador lo asumirá, determinando las condiciones o alcances de dicha protección, así como los amortiguamientos que se prevean en función de la exposición (Deducibles) y el Costo de tal protección (constituida por variables técnicas y comerciales que no entran en consideración en la presente publicación, pero que quizá en el futuro tratemos).

Antes de los considerandos de Análisis de Causa del Daño que habrán de confrontarse con el Alcance de la Cobertura otorgada destinados a determinar la existencia de la responsabilidad del Asegurador, resulta importante destacar la reglamentación que sobre Edificaciones, se tiene actualmente prevista. La **NSR-10** establece en el **TITULO J**, los **Requisitos de Protección contra Incendios** que específicamente cita en el acápite **J.1.1.1**: “...**Toda edificación deberá cumplir con los requisitos mínimos de protección contra incendios establecidos en el presente Capítulo, correspondientes al uso de la edificación y su grupo de ocupación, de acuerdo con la clasificación dada en J.1.1.2**” (encomillado nuestro y referente a la ocupación y que consideramos simplemente enunciar para efectos del proceso de evaluación pre aceptación del riesgo).

La seguridad contra incendios se contempla hoy desde dos aproximaciones, una prescriptiva y otra experimental.

En la primera, se fijan los tiempos de resistencia al fuego concernientes a cada elemento aisladamente. Los métodos de cálculo, de dimensionado y de ensayo permiten por otro lado probar y justificar que los elementos utilizados satisfacen las exigencias solicitadas.

RISK AND CLA

En la segunda, la seguridad contra incendios es una aproximación global por la consideración del edificio como un todo. Hay que considerar un cierto número de parámetros para calcular el nivel de seguridad de un edificio, tal como la probabilidad de comienzo de un incendio, las condiciones de evacuación de los ocupantes, el comportamiento de las estructuras con arreglo a la localización del fuego o las condiciones de propagación. Esta valuación de los riesgos permite un compromiso óptimo entre la estética, lo funcional y el coste, mejorando la seguridad.

Es posible entonces acudir a cálculos avanzados de seguridad contra incendios, mediante hipótesis de escenarios de incendios. El avance de la ingeniería contra incendios basada en hipótesis de **fuego real** es acercar el fenómeno de modo realista y global, teniendo en cuenta por ejemplo los dispositivos de protección (detección, alarma, extracción, rociadores, salidas de emergencia,...). El resultado responde con una mejor seguridad global y un dimensionado óptimo de la protección puede conducir a su supresión total.

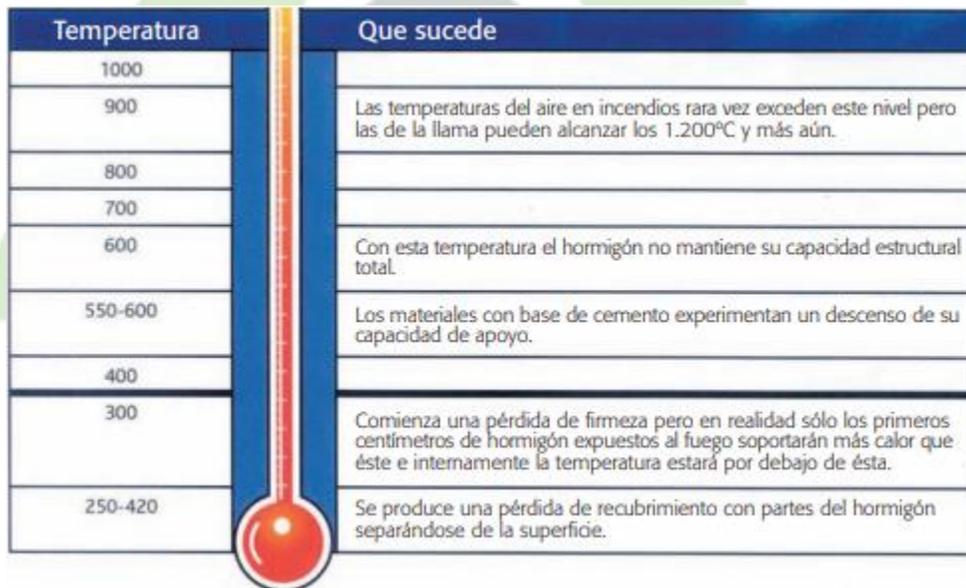
Continuando con los considerando sobre las estructuras de Hormigón, hay dos componentes clave para explicar el comportamiento satisfactorio del hormigón frente al fuego: en primer lugar, sus propiedades básicas como material de construcción y, en segundo, su funcionalidad en una estructura. El hormigón es incombustible (no arde) y tiene una baja velocidad de transmisión del calor (protege frente al fuego), lo que significa que en la mayoría de las estructuras el hormigón puede utilizarse sin ninguna protección adicional frente a incendios. Muchas de las propiedades de resistencia al fuego del hormigón no se alteran, independientemente de que se trate de uno normal para estructuras o ligero, o bien fabricado como bloques o como hormigón aireado en autoclave. En esencia, ningún otro material es un ejemplo tan completo de seguridad en su comportamiento en caso de incendio.

Material de construcción	Resistencia al fuego sin protección	Combustibilidad	Contribución a la carga de fuego	Conductividad térmica	Protección intrínseca frente al fuego	Posibilidad de reparación tras un incendio	Protección a las personas, al evacuar y a los bomberos
Madera	Muy baja	Elevada	Elevada	Baja	Muy baja	Nula	Baja
Acero	Baja	Nula	Nula	Muy elevada	Baja	Baja	Baja
Hormigón	Elevada	Nula	Nula	Muy baja	Elevada	Elevada	Elevada

Fuente: Construmática

No arde. Al contrario que otros materiales de construcción, sencillamente no es posible prender fuego al hormigón. Es resistente a los materiales ardiendo, que pueden alcanzar temperaturas muy elevadas, iniciando o incluso reiniciando un incendio, y las llamas producidas por las sustancias en combustión no pueden inflamarlo.

Fuente: Hormigón sometido al fuego: procesos físicos (Khoury, 2000)



Protege. El hormigón presenta un elevado grado de resistencia al fuego y, en la mayoría de las aplicaciones, puede ser descrito como a prueba de incendios si se diseña adecuadamente.

RISK AND CLA

Es Resistente. El desportillado, descascarillado, mellado, agrietado, rajado, es parte de la respuesta normal del hormigón frente a las altas temperaturas que se producen en un incendio y son fácilmente reparables, sin mayores costos y por lo general no presentan detrimento estructural, aun cuando ello depende de la intensidad y duración del fuego nacidos de los materiales combustibles existentes.



El edificio Windsor ardiendo. Fuente: IECA, España

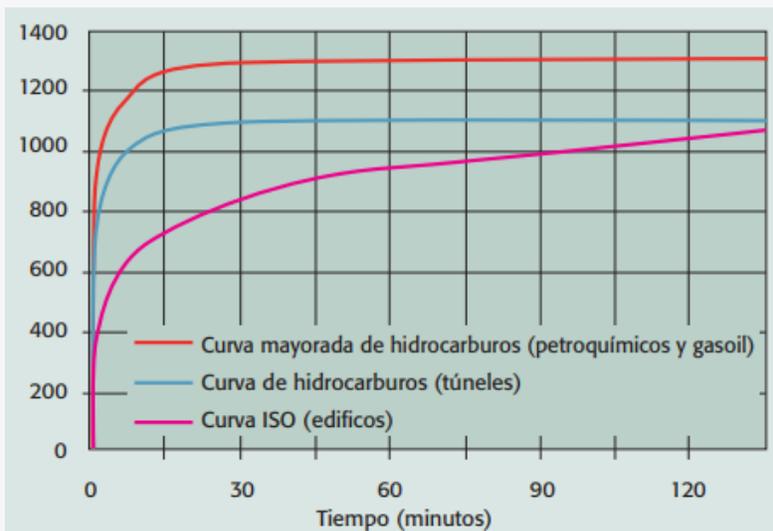
Un ejemplo claro de la resistencia del material en concreto, es el edificio de hormigón

Windsor que se

comportó extraordinariamente bien en un incendio muy severo y claramente mucho mejor de lo que hubiera sido esperado por aplicación estricta de la normativa vigente sobre estructuras de hormigón. La necesidad de un tratamiento ignífugo adecuado de los elementos de acero para garantizar su comportamiento en caso de incendio se vio de nuevo confirmada. Habida cuenta del comportamiento de estos elementos en las plantas en las que ya se había aplicado dicho tratamiento, es muy probable, aunque obviamente esto no puede afirmarse con absoluta certeza, que si el incendio se hubiera producido después de que la estructura de las plantas superiores hubiera sido ignífugada, éstas no se habrían derrumbado y que las consecuencias del

sinistro habrían sido probablemente mucho menores.

Sin embargo, es de tener en cuenta que de acuerdo con Munich Reinsurance Group (2003), por ejemplo, expresa que hay una probabilidad 20 veces mayor de que se produzca incendio en un túnel de carretera y aunque es previsible un deterioro mayor de carácter estructural, estos incendios extremos a menudo se traducen en pérdidas de vidas.



En los incendios de los túneles pueden alcanzarse temperaturas muy elevadas. Fuente: J.-F. Denoël/Febecem, Bélgica).

A manera de conclusión en ésta primera parte de la tercera Edición de nuestro servicio de divulgación, es menester que tanto en el proceso de suscripción, como en el de la atención de la reclamación por fuego, se tengan en cuenta algunas consideraciones, como las siguientes:

Ruina Progresiva o Efecto Domino: The Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2003) define la ruina progresiva como una situación en la cual los componentes principales de la estructura fallan localmente generando el colapso de las

estructuras contiguas a ellas, las cuales a su vez generan una ruina adicional. La ruina progresiva es una reacción en cadena de las estructuras precedida por el daño de una porción relativamente pequeña de la estructura.

RISK AND CLAIM ADVISOR

Método Constructivo: Aunque no es común realizarlo en el proceso de suscripción, si es menester considerar como parte del análisis de la relación Causa – Consecuencia en la reclamación, los siguientes factores:

1. **Redundancia Estructural**
2. **Presencia de material dúctil en miembros estructurales y de detalle**
3. **Cálculo de resistencia a cargas reversibles**
4. **Cálculo de resistencia a fallas cortantes**
5. **Información de componentes estructurales principales y secundarios**
6. **Información de componentes No estructurales principales y secundarios**

Comportamiento de humos de Combustión

Se define Fuego a la reacción de combustión caracterizada por la emisión de calor mediante la presencia de humo y llamas. Combustible, sustancia la cual es capaz de arder mediante la presencia de algún comburente y energía de activación; un combustible puede ser sólido (carbón, plástico, madera) líquido (gasolina, gasoil, alcoholes, disolventes) o gaseoso (gases, hidrogeno, etileno) según su naturaleza. Comburente, sustancia en cuya presencia el combustible es capaz de arder; comúnmente es el oxígeno el principal comburente.

Respecto al criterio de clasificación se basa en la velocidad con la que se desarrolla la combustión, que puede clasificarse así:

1. Combustiones lentas: Se producen sin emisión de luz y con poca emisión de calor. Se dan en lugares con escasez de aire, combustibles muy compactos o cuando la generación de humos enrarece la atmósfera, como ocurre en sótanos y habitaciones cerradas. Son muy peligrosas, ya que en el caso de que entre aire fresco **puede generarse una súbita aceleración del incendio, e incluso una explosión.**

2. Combustiones rápidas: son las que se producen con fuerte emisión de luz y calor, con llamas. Cuando las combustiones son muy rápidas, o instantáneas, se producen las explosiones. **Las atmósferas de polvo combustible en suspensión son potencialmente explosivas.** Si la velocidad de propagación del frente en llamas es menor que la **velocidad del sonido (340 m/s)**, a la explosión se le llama **Deflagración**. Asimismo cuando la velocidad de propagación del frente de llamas es **mayor que la velocidad del sonido, a la explosión se le llama Detonación.**

Debemos, consecuentemente, considerar que en caso de **Explosión o Deflagración de humos concentrados**, se presente sobre esfuerzos sobre las estructuras estructurales y no estructurales. Dichos fenómenos deben ser identificados, incluso a partir de informes de bomberos que permitan verificar tales condiciones, pues si es posible que ante fenómenos generadores de empuje, se presenten fallas por sobre carga o tensión en elementos portantes estructurales. Para un adecuado entendimiento veamos las dos clases de explosión o deflagración de humos provenientes de combustión:

FLASHOVER O COMBUSTIÓN SÚBITA GENERALIZADA - Es un fenómeno que se observa en incendios confinados en los cuales de forma repentina todas las superficies combustibles, que hasta ese momento no estaban implicadas en el incendio, comienzan a arder a consecuencia de la radiación proveniente de las llamas que recorren el techo (rollover) provocando que todo el volumen del recinto sea ocupado por las llamas. Este fenómeno marca el máximo desarrollo del incendio, generándose radiaciones de hasta 170 kW/m² que no pueden ser soportadas por un ser humano ni equipado con un traje de intervención de bombero.

CONDICIONES DE UN FLASHOVER

Para que se produzca este fenómeno es necesario que el incendio se encuentre adecuadamente ventilado, siendo otros factores que influyen el combustible implicado en el incendio, la altura del techo y la capacidad del recinto para contener una bolsa de gases. En habitaciones normales, los gases y otros productos de la combustión se acumularan bajo el techo al menos hasta la altura del dintel de una puerta o de la abertura situada a mayor altura. Serán estos gases los que al arder generen la radiación suficiente para provocar la ignición de los combustibles de los planos inferiores.

Se han realizado múltiples experimentos, coincidiendo la mayoría de la bibliografía en marcar la radiación necesaria para que se produzca el fenómeno en 20 kW/m² a la altura de la superficie de los combustibles, o bien una temperatura de 600 °C de la capa de gases.

Este fenómenos se encuadra dentro del **Desarrollo Rápido del Incendio** (en inglés, *Rapid Fire Progress*), que es aquel que provoca un desarrollo anormalmente rápido del incendio, como son el, la explosión de humo, la auto ignición de los gases del incendio y otros que suponen un importante riesgo.

INDICIOS DE UN FLASHOVER

- Llamas que corren por el techo (se dan las condiciones).
- Emisión de vapor de agua de las superficies combustibles como paso previo a la pirolisis de las mismas (se puede producir en pocos minutos o segundos)
- Súbito aumento del calor radiante, descenso del plano neutro; comienzan a arder objetos próximos al origen del fuego (inminente o ha comenzado)

BACKDRAFT O EXPLOSIÓN DE GASES DE HUMO - Llamado también *explosión de gases de humo con efecto reverso*, es una situación que puede ocurrir cuando un fuego necesita oxígeno; por lo cual la combustión cesa pero sigue habiendo gases y humo combustible con temperatura alta.

RISK AND CLAIM ADVISOR

Si el oxígeno se reintroduce, por ejemplo abriendo una puerta en un cuarto cerrado, la combustión puede recomenzar dando por resultado un efecto explosivo dado que los gases se calientan y aumentan su volumen súbitamente. Este efecto es la base para la explosión del humo.

CARACTERÍSTICAS DE UN BACKDRAFT

Las señales características que lo preceden incluyen el humo amarillo o marrón, el humo que emana de los agujeros pequeños de las salidas por soplos [una clase de efecto de respiración] y que se encuentran a menudo alrededor de los bordes de puertas y ventanas que aparecen marrones o negras cuando se ven desde el exterior.

Estos colores más oscuros son causados por la combustión incompleta. Si el recinto contiene muchos rastros de hollín, indica que carece de bastante oxígeno para permitir la combustión. Los bomberos miran a menudo si hay hollín en el interior de ventanas y en grietas alrededor del cuarto. Las ventanas pueden agrietarse debido al calor. Las ventanas de la estructura pueden también tener una vibración leve debido a los diferenciales de presión. El ambiente circundante estará extremadamente caliente.

Si se detecta un recinto que "respira", es decir, exhala humo para volver a inhalarlo por la misma vía, por ejemplo a través de una grieta o debajo de una puerta, debe haber evacuación inmediatamente, porque esto es una indicación de que el backdraft es inminente. Debido a los diferenciales de presión, estos soplos de humo "se aspiran a veces" nuevamente dentro del espacio del cual emanan, que es donde el término "backdraft" se origina.

También una explosión por humo o backdraft se caracteriza por que en el interior del recinto se escuchan sonidos sordos (sin eco) debido a que el recinto está lleno de humo y este ocupa el espacio haciendo que no exista el mínimo eco y porque al tocar una puerta está caliente en su totalidad.

El Backdraft se presenta debido a que el fuego tiene elementos que necesita para vivir [Oxígeno, Materia (lo que se quema) y Temperatura], que al juntarse, producen una reacción química en cadena (el tetraedro de fuego); en el backdraft solo se omite el oxígeno y al disponer de éste, vuelve a producirse la reacción química en cadena de forma violenta (explosión).

ANEXO – PATOLOGIAS

Efectos de incendios en estructuras de hormigón armado

RISK A

Un incendio constituye una amenaza para la vida por la asfixia, el envenenamiento y las temperaturas elevadas, pero de producirse en un edificio el peligro aumenta por la propia estructura del edificio. En un recinto exterior, con aire fresco, es casi imposible superar los 700°C. En un recinto cerrado la temperatura sube un 30% más debido a la reflexión y radiación de las paredes.

El punto crítico de ignición (**flashover point**) se sitúa en los 273°C, hasta este momento sólo la estructura de aluminio se vería afectada. A partir de aquí se desarrolla el llamado fuego equivalente o normalizado que es al que se refieren todas las reglamentaciones y las resistencias al fuego de materiales, medido en minutos. Por encima de 40 minutos de fuego equivalente ya estamos hablando de un incendio muy importante con riesgo cierto para la vida humana.

Para tener una referencia de cómo afectan las altas temperaturas a los materiales, diremos que a 400°C el acero se vuelve dúctil y a 600°C se produce una bajada brusca de su resistencia.

El hormigón comienza a deteriorarse a temperaturas superiores a los 380°C en periodos prolongados de tiempo. A 400°C se produce una pérdida de resistencia entre 15-25 %, según sea de áridos calizos o silíceos. Por encima de los 800°C, deja de poseer una resistencia a la compresión viable, y se debilitará en mayor medida al enfriarse cuando se apague el fuego.

Efectos sobre el hormigón armado

Los efectos en las estructuras de hormigón armado empiezan en el propio comportamiento de los materiales. Como hemos visto, el hormigón pierde menos capacidad a altas temperaturas que el acero. En el caso de acero pretensado se acusa mucho más: cuando el hormigón sufre pérdidas del 35%, estaríamos hablando de que el acero pretensado pierde 60-70% de su capacidad.

A diferencia del acero, el hormigón está expuesto al fuego, por tanto las evaluaciones son más complejas. Además de las variables propias de cada incendio (carga de combustible, aireación, etc.), la variación en los resultados del hormigón puede deberse a una serie de factores intrínsecos como la densidad, la porosidad, el tipo de árido y el método de vibración durante la ejecución.

Básicamente, los principales efectos del fuego en el hormigón armado, podrían resumirse en:

- Daños a la adherencia por salto térmico entre las armaduras de acero y el hormigón que las recubre.
- Pérdida significativa de espesor del recubrimiento del hormigón, debida al efecto spalling o desprendimiento por explosión del hormigón.
- Una disminución de la resistencia del hormigón cuando su temperatura supera los 380°C durante periodos prolongados.
- Una disminución de la resistencia de las armaduras de acero cuando la temperatura supera los 250°C.
- Daño o destrucción de las juntas y sellados, lo que en determinadas estructuras puede conducir al colapso.

2.1. Daños a la adherencia.

RISK A



La existencia de coqueas o debilitamientos en la sección del hormigón, permite que las altas temperaturas atraviesen el hormigón y lleguen a las armaduras muy rápidamente. El acero es buen conductor por lo que se calienta toda la barra de acero pero no el hormigón. El acero tiende a dilatar y el hormigón no. Esto produce compresiones y fisuras. Después se produce el enfriamiento y la rotura.

La adherencia se daña precisamente por ese salto térmico.

En el caso de hormigón pretensado esto se agudiza ya que trabaja por adherencia.

Este fenómeno se produce o bien por un incremento de temperatura brutal o bien por un enfriamiento brusco (una extinción agresiva).

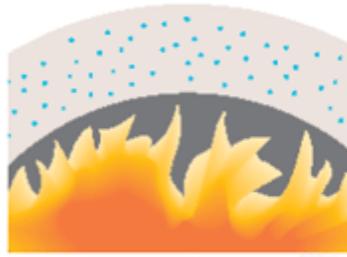
La rotura del hormigón por adherencia se produce con el enfriamiento, es decir, cuando ya no hay humo. Por tanto las grietas aparecidas así son blancas, porque la superficie interior no está ahumada.

2.2. Efecto spalling

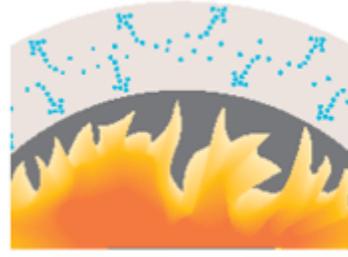
El proceso de desprendimiento, también llamado spalling, tiene lugar rápidamente, a los 100-150 °C, como resultado del impacto térmico y el cambio de estado del agua intersticial.



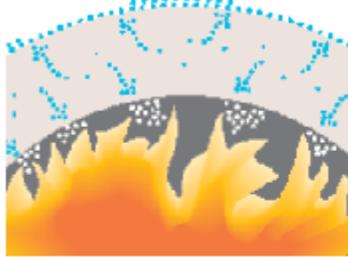
RISK A



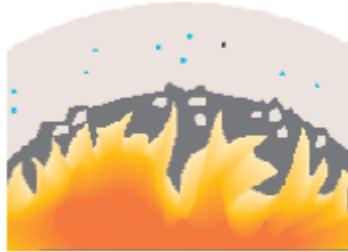
1. El vapor de agua es un componente estable e integral del hormigón con carácter previo a su calentamiento.



2. Comienza la migración de vapor de agua a través de capilares, a medida que se calienta el hormigón.



3. El vapor de agua emerge como vapor en la parte caliente, y como agua líquida en la parte fría, a medida que aumenta la temperatura del hormigón.



4. Comienza el desgajamiento a medida que el hormigón se seca localmente.

A medida que el agua se convierte en vapor y debido a la densa estructura del hormigón, el vapor no puede escapar eficientemente a través de su matriz, y la presión aumenta. Cuando la presión en el hormigón es superior a su resistencia, comienza el proceso de desprendimiento o spalling. Estas coqueas así producidas dejan al descubierto el hormigón “fresco”, que queda expuesto a un calor intenso, lo que reproduce el proceso de desprendimiento a mayor velocidad.



El efecto spalling es inmediato, por lo que el hormigón de recubrimiento salta durante el incendio, es decir que la superficie interior queda expuesta al humo y el hollín: las grietas y coqueas por spalling quedan ennegrecidas.

Un spalling masivo puede llevar a la pérdida total del hormigón de recubrimiento o “**fall of**”, dejando al descubierto las armaduras.

Hasta ese momento el hormigón había evitado que el acero alcanzara grandes temperaturas, por lo que preservaba también su resistencia. Al mismo tiempo, la magnitud del incendio es tal que el acero alcanza rápidamente la temperatura de 250°C y superiores. Sobreviene la disminución de resistencia de las armaduras.

Si estamos hablando del incendio en el interior de un edificio, la parte de la estructura más expuesta al fuego y también la más sensible es la cara inferior de los forjados. Aquí las tensiones son de tracción y fundamentalmente soportadas por las armaduras de acero. De modo que si éstas se ven afectadas por altas temperaturas, la disminución de su resistencia se traduce en la transmisión de esfuerzos al hormigón, ya sobre tensionado interiormente. Resulta en la rotura frágil a cortante del hormigón y el colapso del forjado por la rotura a momentos negativos del armado.

El efecto spalling depende en gran medida de la proporción de agua/cemento en el hormigón. Se admite que con contenidos de humedad inferiores al 3% no hay riesgo. Lo que se cumple con clase de exposición I.

En hormigón de alta resistencia se recomienda disponer de 2 a 3% fibras de polipropileno muy finas ($f > 30 \mu\text{m}$), de forma que esas fibras se funden al subir la temperatura y permiten así vías de expansión del vapor.

RISK A

Consideraciones finales

Comprobamos la importancia de garantizar el espesor del hormigón de recubrimiento. Además de esto, podemos limitar la temperatura del hormigón (y del acero) para retardar o evitar que alcance su temperatura crítica mediante métodos de protección pasiva.

En el caso del spalling, no sólo supone un importante daño a la estructura. Teniendo en cuenta que se da en una fase temprana del incendio, se produce cuando todavía puede haber personas en el edificio o están los equipos de extinción y rescate. El hormigón desprendido explosionado es una lluvia de escombros, pudiendo provocar lesiones y bloqueando las vías de salida. Se dificultan en gran medida la evacuación de personas y el trabajo de los equipos de extinción de incendios.

Por tanto, parece que se trataría de impedir o al menos retardar el spalling o desprendimiento del hormigón.

Aparte de controlar el tipo de hormigón, dosificación, etc... Una forma sería la aplicación de una protección pasiva contra incendios al revestimiento del hormigón. La aplicación de una capa de producto inorgánico adecuado de protección contra incendios impide el desprendimiento del hormigón tanto durante el periodo de estabilidad exigido como más allá de dicho periodo, puesto que el material continúa proporcionando un nivel previsible de protección mediante el aislamiento térmico del hormigón. Esta acción impide el desmoronamiento repentino de una estructura, inmediatamente después de un periodo especificado de estabilidad o de un incendio de larga duración.

BIBLIOGRAFÍA

CEPREVEN (2003): Curso Monográfico "Protección pasiva contra incendios". CEPREVEN, Asociación de Investigación para la Seguridad de Vidas y Bienes. Madrid, noviembre 2003.

FALLER, GEORGE (2004): "La identificación de riesgos y el diseño contra incendios". ICCP Arup Fire. Ponencia del Seminario "Análisis de riesgos y fiabilidad estructural. Ingeniería de fuego". IETcc - Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, marzo 2004.

