

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

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

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

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

Recepção: 07/06/2019 | Aceitação: 11/11/2019 | Publicação: 30/12/2019

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*.

Citar como: Britez, C., Carvalho, M., Helene, P. (2020), "Ações e efeitos deletérios do fogo em estruturas de concreto. Uma breve revisão", 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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo, No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 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*.

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

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 hormigón armado en situación de incendio.

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

1. INTRODUÇÃO

Na temática da concepção de estruturas e da ação excepcional do fogo, comparado com outros materiais de construção civil (desprotegidos), o concreto possui uma série de atributos, conforme pode ser observado na Figura 1. Nesse contexto, destaca-se que existem dois componentes principais responsáveis pelo desempenho positivo do concreto em situação de incêndio: o primeiro relacionado com as propriedades intrínsecas do material e o segundo com a sua funcionalidade quando inserido na estrutura global.

Materiais de construção (desprotegidos)	Resistência ao fogo	Facilidade de combustão	Contribuição nas cargas de incêndio	Taxa de elevação de temperatura na seção transversal	Proteção ao fogo (intrínseca do material)	Facilidade de reabilitação (pós incêndio)	Proteção para evacuação e bombeiros
MADEIRA	BAIXA	ALTA	ALTA	MUITO BAIXA	MUITO BAIXA	NULA	BAIXA
AÇO	MUITO BAIXA	NULA	NULA	MUITO ALTA	BAIXA	BAIXA	BAIXA
CONCRETO	ALTA	NULA	NULA	BAIXA	ALTA	ALTA	ALTA

Figura 1. Resumo do desempenho de materiais de construção civil (desprotegidos) sob ação do fogo (traduzido de Jacobs, 2007).

O concreto é incombustível (não queima) e possui baixa taxa de elevação de temperatura ao longo de sua seção transversal, portanto, na maioria dos sistemas estruturais o material pode ser usado sem quaisquer proteções adicionais ao fogo.

Nesse artigo, tem-se a oportunidade 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.

2. ASPECTOS DO CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

2.1 O fogo, o concreto e o incêndio

No Brasil, a ABNT NBR 13860:1997 apresenta a seguinte definição: “*O fogo é o processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz*”. No entanto, segundo Seito et al. (2008), apesar dos grandes avanços na ciência do fogo, ainda não há um consenso mundial para definir o fogo, devido não haver uma concordância clara nas definições das principais normalizações internacionais vigentes.

Seito et al. (2008) esclarecem que inicialmente foi formulada uma teoria conhecida como Triângulo do Fogo, a qual era formada por três elementos fundamentais: o combustível, o comburente (oxigênio) e o calor. De acordo com essa teoria, a remoção de algum destes elementos do triângulo seria responsável diretamente pela extinção do fogo.

Por outro lado, com a descoberta do agente extintor *halon*¹, a teoria foi reformulada, sendo conhecida atualmente por Tetraedro do Fogo (Figura 2). Por sua vez, o Tetraedro do Fogo é formado pelos seguintes elementos: o calor, o comburente, o combustível e a reação em cadeia.

O calor é o elemento que serve para dar início a um incêndio, manter e aumentar a sua propagação. O comburente (oxigênio) é necessário para a combustão e está presente no ar que nos envolve. O combustível é o elemento que serve de propagação do fogo e pode ser sólido, líquido ou gasoso. A reação em cadeia torna o processo de queima autossustentável. Basicamente, o calor irradiado das chamas atinge o combustível e este é decomposto em partículas menores, as quais se combinam com o oxigênio e queimam, irradiando outra vez calor para o combustível, formando assim um ciclo constante (autossustentável).

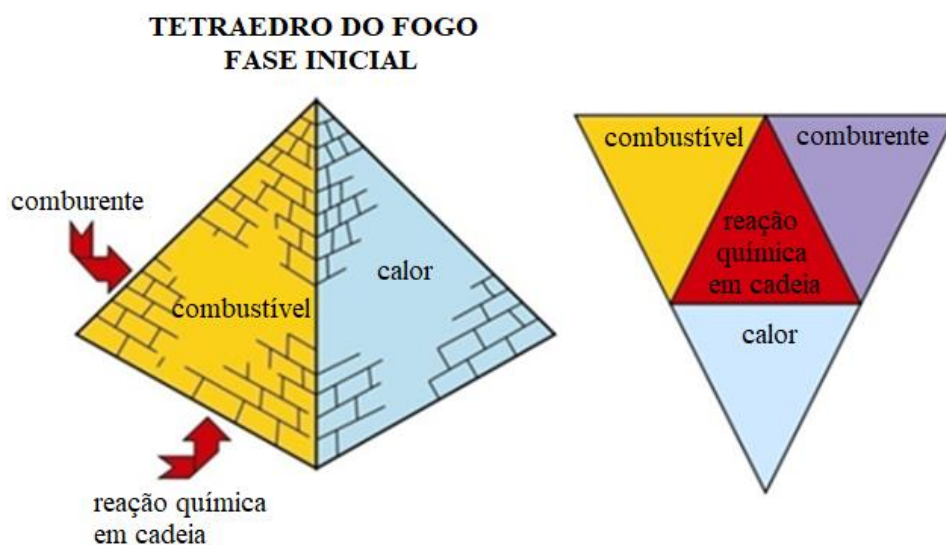


Figura 2. Tetraedro do fogo (adaptado de Seito et al., 2008).

O **concreto** (visto exclusivamente como um material) é reconhecido pela sua boa resistência em temperaturas elevadas em virtude de suas características térmicas, tais como: a incombustibilidade

¹ O *halon* (hidrocarboneto halogenado) é um agente extintor de compostos químicos formados por elementos halogênios (flúor, cloro, bromo e iodo). Foi banido pelo Protocolo de Montreal por ser nocivo à camada de ozônio. O Protocolo de Montreal, por sua vez, é um tratado internacional em que os países signatários comprometem-se a substituir as substâncias nocivas à camada de ozônio.

e a baixa condutibilidade térmica. Além disso, o concreto não exala gases tóxicos ao ser aquecido e os elementos apresentam maior massa e volume quando comparados com outros materiais como, por exemplo, os elementos de estruturas metálicas e de madeira, ou seja, potencialmente resistem por mais tempo.

Pode-se afirmar, portanto, que o concreto não é um elemento fundamental do Tetraedro do Fogo, pois ele não é um combustível em forma sólida. Quando da ocorrência de um incêndio, o concreto sofre as consequências da queima de algum material inflamável, seja sólido, líquido ou gasoso. Geralmente, em edificações comerciais e residenciais, essa carga inflamável é procedente de materiais sólidos de base celulósicos, tais como portas, mobiliário, material de escritório, carpetes, cortinas, etc.

De forma geral, diversos estudos apontam, conservadoramente, que uma porção mais exposta do concreto perde aproximadamente 25% de sua resistência mecânica original à compressão quando aquecido em temperaturas da ordem de 300°C e aproximadamente 75% quando essa temperatura alcança um patamar da ordem de 600°C em seu interior.

Além da redução da resistência, pesquisas precursoras desenvolvidas por Abrams (1971) e Neville (1981) indicavam que os concretos considerados normais² sofriam altos gradientes térmicos quando eram expostos ao fogo e havia uma forte tendência das camadas quentes da superfície se separarem por deslocamento das camadas mais frias do interior do elemento. Esse tipo de deslocamento é mundialmente conhecido por *spalling*.

O incêndio, geralmente, inicia-se em pequenas proporções e o seu crescimento depende do primeiro item ignificado³, das características do desempenho ao fogo dos materiais na proximidade deste item ignificado e da sua distribuição no ambiente (Seito et al., 2008).

Costa & Silva (2003) e Costa (2008) descrevem que, em geral, a curva representativa da variação de temperatura em um incêndio real é caracterizada por dois ramos bem definidos (um ascendente e outro descendente) com **três estágios** delimitados por dois pontos (Figura 3): *flashover*⁴ e temperatura máxima. Esses **três estágios** são explicitados a seguir.

- **Ignição (ou Ignificação):** estágio de aquecimento no início do incêndio, com crescimento gradual de temperatura, com mínimas influências das características do compartimento e sem risco à vida humana ou ao patrimônio, por colapso estrutural. Esse estágio é também conhecido por *pré-flashover* e finaliza no instante conhecido por *flashover*.
- **Flashover:** estágio caracterizado por uma repentina mudança de crescimento da temperatura; nesse estágio todo o material combustível no compartimento entra em combustão. A temperatura dos gases quentes é superior ao patamar de 300°C até atingir o pico da curva, geralmente com temperaturas superiores a 1000°C.
- **Resfriamento:** estágio que representa a redução gradativa da temperatura dos gases no ambiente, após a completa extinção do material combustível presente no compartimento. Sem novas cargas de incêndio para alimentar as chamas, inicia-se a perda de calor, ou seja, o arrefecimento gradual do incêndio.

² Entende-se nesse texto que os concretos considerados “normais” (ou convencionais) são aqueles com resistência inferior a 50MPa, conforme recomendação da *Portland Cement Association (PCA)*, registrada no documento *High Strength Concrete* (publicado em 1994 por Farny e Panarese) e adotada como padrão nesse texto.

³ Do verbo ignificar (inflamar-se, abrasar-se, transformar-se em fogo).

⁴ O termo *flashover* pode ser definido como: instante de inflamação generalizada, embora, não haja consenso na literatura nacional sobre essa tradução e sendo muito mais popular no Brasil e no exterior o termo direto em inglês *flashover*.

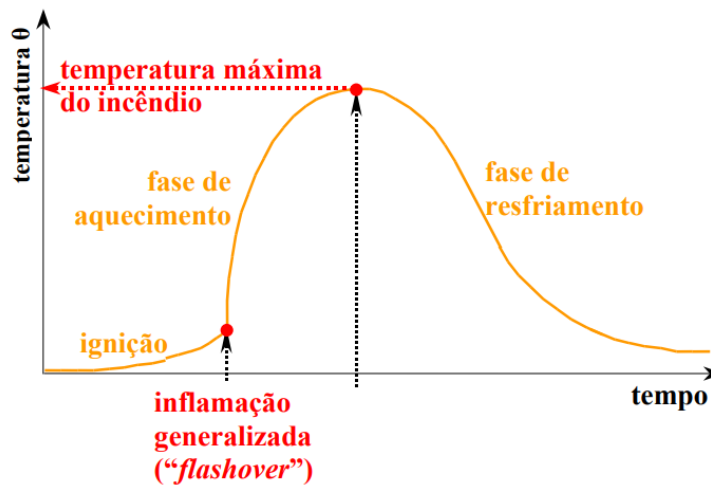


Figura 3. Estágios principais de um incêndio real (Costa & Silva, 2003).

Em geral, a simulação do incêndio real ou natural em uma estrutura é bem complexa e pode ser bastante singular, pois, cada incêndio possui suas particularidades, as quais dependem diretamente da taxa de aquecimento, da temperatura máxima atingida e da duração do evento (sinistro de incêndio).

Considerando essa situação, Costa & Silva (2003, 2006) observaram que, para facilitar a determinação da ação térmica nas estruturas, modelos matemáticos de incêndio foram formulados para descrever a variação da temperatura do compartimento em função do tempo do incêndio.

A relação temperatura-tempo, nesses casos específicos, pode ser representada por “curvas temperatura-tempo” ou “curvas de incêndio”, as quais são padronizadas e popularmente conhecidas como “curva-padrão de incêndio”.

2.2 Curvas padronizadas de simulação de incêndio

Trata-se de curvas-padrão adotadas nos ensaios experimentais e laboratoriais de resistência ao fogo, no intuito de padronizar os ensaios e fornecer subsídios suficientes para analisar e comparar os resultados obtidos, uma vez que a simulação do incêndio foi normalizada (Costa e Silva, 2006). Nessa perspectiva, quando o tempo mínimo de resistência dos elementos estruturais é determinado por meio da curva-padrão de incêndio, o mesmo é denominado como **Tempo Requerido de Resistência ao Fogo** ou simplesmente pela sigla **TRRF** (no Brasil, especificado conforme a ABNT NBR 14432: 2001).

O **TRRF** é um período mínimo normalizado o qual considera que uma determinada estrutura manterá suas funções de desempenho durante um cenário de incêndio simulado por uma curva-padrão.

Em geral, esse período é expresso em intervalos de 30min com valores predeterminados, em função de diversos fatores (*fib*, 2007): tipo de ocupação/uso, altura e quantidade de pavimentos da edificação, quantidade de pessoas para evacuação, dimensões dos compartimentos, rotas de fuga/saídas de emergência e sistemas de proteção disponíveis (extintores, chuveiros automáticos, entre outros).

Na Figura 4, apresentam-se os perfis das temperaturas que simulam três cenários padrões de incêndio normalizados que são comumente usados em estudos experimentais, sendo: (a) o cenário de incêndio em túneis; (b) o ocasionado por materiais a base de hidrocarbonetos e (c) o ocasionado em edificações (por materiais a base de celulósicos).

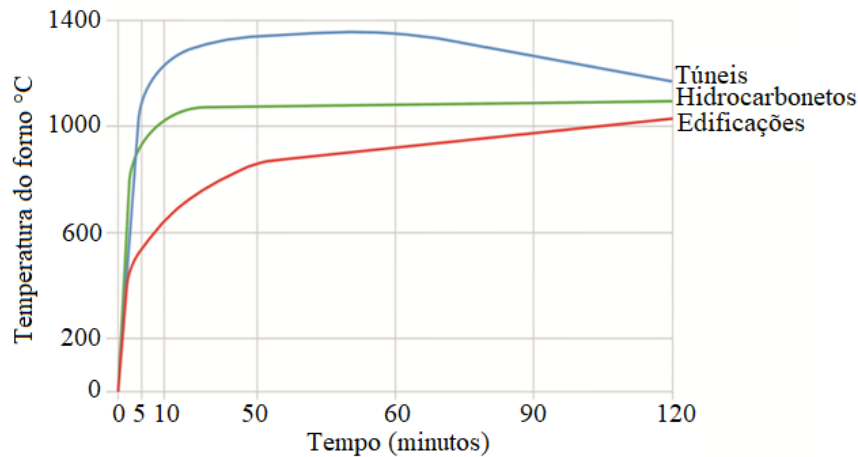


Figura 4. Curvas “idealizadas” para três cenários de simulação de incêndio: túneis, hidrocarbonetos e edificações – materiais celulósicos – até 120 minutos (The Concrete Centre, 2004).

As três curvas idealizadas e padronizadas mais difundidas no meio técnico e utilizadas nos estudos experimentais, que envolvem simulações de cenários de incêndio, causados por materiais a base de celulósicos em elementos de concreto, são as curvas: ISO 834, ASTM E119 e JIS A 1304 (Phan, 1996). Essas curvas são bem similares e podem ser observadas, sobrepostas, na Figura. 5. As curvas-padrão relacionadas a Túneis e Hidrocarbonetos não serão abordadas nesse artigo podendo ser consultadas em Leonardo Da Vinci Pilot Project: Handbook 5 (2005).

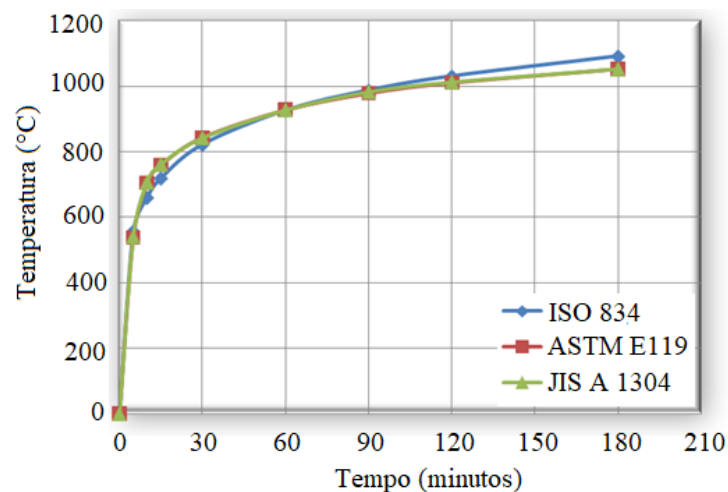


Figura 5. Curvas de incêndio-padrão (adaptado de Phan, 1996).

A curva ISO 834 é uma das mais usadas nos estudos experimentais internacionais, sendo também adotada no Brasil – transcrita na ABNT NBR 5628:2001. Essa curva especifica que a amostra deve ser submetida uma elevação de temperatura no interior do forno, dada pela seguinte equação logarítmica (Equação 1):

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

Em que:

t = tempo, expresso em minutos (min);

θ = temperatura do interior do forno no tempo t, expressa em graus Celsius (°C);

θ_0 = temperatura inicial do interior do forno, expressa em graus Celsius (°C).

Outras curvas-padrão para materiais inflamáveis (ASTM E1549, RWS e RABT) foram modeladas

em função da severidade do incêndio e têm sido internacionalmente recomendadas para situações especiais (Costa, 2008). Há também curvas de incêndio denominadas “curvas naturais”, parametrizadas pela quantidade de material combustível (carga de incêndio), pelo grau de ventilação e pelas características térmicas e físicas dos materiais da compartimentação. Essas curvas são modelos simplificados do incêndio real e não serão abordadas nesse texto podendo ser consultadas em Leonardo Da Vinci Pilot Project: Handbook 5 (2005).

2.3 Distribuição de temperatura no interior do concreto

O calor é a energia que está sendo transferida de um sistema para outro em virtude de uma diferença de temperatura. Basicamente, existem três mecanismos clássicos de transferência de calor: o de condução, o de convecção e o de radiação.

Na condução, a energia térmica é transferida através das interações entre os átomos ou moléculas, embora não haja o transporte destes átomos ou moléculas, somente o deslocamento de energia; na convecção, a energia é transportada na forma de calor, através do transporte direto de massa; na radiação, a energia térmica é transportada através do espaço na forma de ondas eletromagnéticas que se movem na velocidade da luz.

Na ocorrência de incêndio há uma combinação desses três mecanismos de transferência de calor, no entanto, no interior da massa de concreto há predominância do fluxo de calor por **condução**.

Nesse contexto, o cálculo do desenvolvimento de um campo de temperaturas na seção transversal de um elemento de concreto estrutural, exposto ao fogo, envolve a resolução da equação diferencial clássica de *Fourier* (Equação 2):

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

Em que:

λ_{θ} : é a condutividade térmica do material (W/m °C);

$\rho \cdot c$: é a calor específico volumétrico do material (produto da massa específica e o calor específico absoluto) (J/kg °C);

x, y e z: as coordenadas cartesianas do sistema tridimensional;

Q: é taxa de calor interno gerado no material;

$\partial \theta$: é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor;

t: tempo (s).

A geração de calor interna Q pode ser considerada 0 (zero) para o caso de materiais não combustíveis (como o concreto). As condições de contorno (na superfície do elemento) são expressas em termos de equações de fluxo de calor e as propriedades térmicas do material dependem do tipo e da quantidade dos insumos empregados na dosagem do concreto (Leonardo Da Vinci Pilot Project: Handobook 5, 2005).

Para exemplificar o comportamento da evolução do campo de temperaturas em função do tempo em um elemento de concreto, apresenta-se o estudo por simulação computacional realizado por Ongah, Mendis & Sanjayan (2002) em paredes de concreto de alta resistência (Figura 6) com somente um dos lados expostos ao fogo. O gráfico indica o significativo gradiente térmico no interior do material (concreto), de acordo com um modelo de fluxo de calor que simula numericamente o cenário de incêndio.

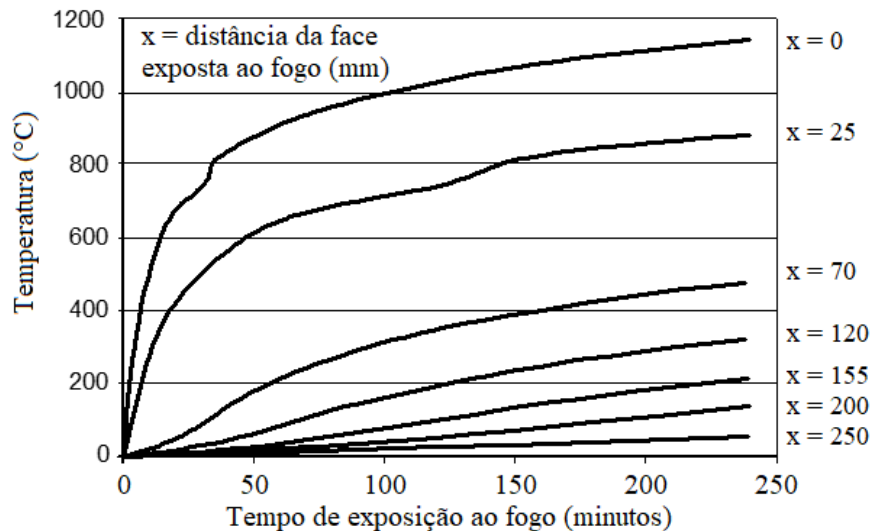


Figura 6. Evolução do campo de temperaturas em uma parede de concreto de alta resistência em função do tempo de exposição ao fogo (Ongah, Mendis & Sanjayan, 2002).

Outra forma de apresentar a evolução da temperatura dentro de um elemento de concreto, prescrita pelos principais códigos internacionais, pode ser observada na Figura 7. Nesse caso são apresentadas as curvas instantâneas de tempos padronizados em função da temperatura e da profundidade da superfície exposta ao fogo, modelo de apresentação muito comum adotado por pesquisadores e nos códigos de diversos países.

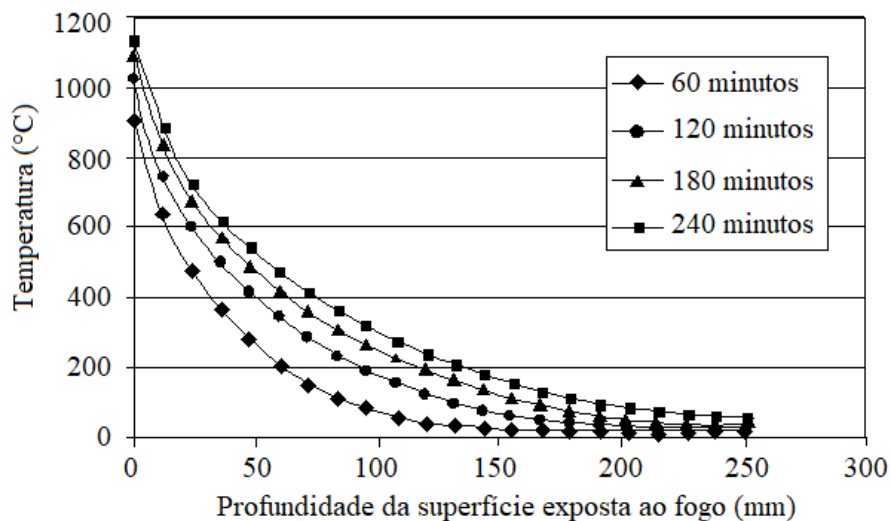


Figura 7. Distribuição de temperatura em função da distância da superfície exposta ao fogo e do tempo de exposição ao fogo, calculada através de modelo numérico (Ongah, Mendis & Sanjayan, 2002).

2.4 Alterações na microestrutura do material concreto em elevadas temperaturas

Considera-se bastante complexa a análise precisa do comportamento das alterações na microestrutura de uma amostra de concreto, visto que cada concreto possui sua singularidade em virtude das vastas alternativas de insumos e de adições disponíveis, bem como do emprego de diferentes metodologias de dosagem. Destaca-se, também que, em elevadas temperaturas, a anisotropia e a heterogeneidade material concreto tornam-se muito mais evidentes.

Obviamente, algumas reações são mais marcantes tendo em vista o conhecimento prévio dos aspectos litológicos dos agregados, adições e do tipo de cimento empregado na dosagem do concreto. Quanto especificamente à natureza litológica do agregado, a Figura 8 exhibe a diferença

acentuada no comportamento (estabilidade térmica) de diversos agregados em função do aumento de temperatura. Tâmis.

No contexto da microestrutura, Taylor (1990) cita que devido a sua baixa condutividade térmica e ao alto calor específico, o concreto provê boa proteção ao aço em situação de incêndio, entretanto, esse pode ser severamente danificado devido às ações de origem térmica que prejudicam principalmente a pasta de cimento. Destaca que em baixas temperaturas, a pasta de cimento se expande quando aquecida, mas a partir dos 300°C ocorre uma contração associada com a perda de água. Nesse estágio, os agregados continuam se expandindo, e as tensões internas resultantes podem propiciar a perda de resistência, a fissuração e o deslocamento. Alguns fenômenos são mais explícitos, os elementos de quartzo, por exemplo, se expandem nitidamente a 573°C devido a uma transformação polimórfica de cristalização e a calcita se contrai a partir dos 900°C devido a sua decomposição generalizada.

Taylor (1990) descreve, ainda, os efeitos térmicos na pasta de cimento, e assinala que: abaixo de 500°C, ocorrem principalmente a carbonatação e a dilatação dos poros da matriz; entre 450 e 550°C, a decomposição do C-S-H, e em 600°C, a decomposição do CaCO_3 , proporcionando CaO, que eventualmente pode se reidratar durante a fase de resfriamento.

Especificamente quanto ao papel da água, Kalifa et al. (2000) observam que o excesso de água contida nas pastas de cimento *Portland* saturadas participa na formação de gradientes significativos de pressão na rede de poros do concreto durante a transferência de massas (evaporação da água) e, conseqüentemente, no aumento das fissurações decorrentes da contração da pasta.

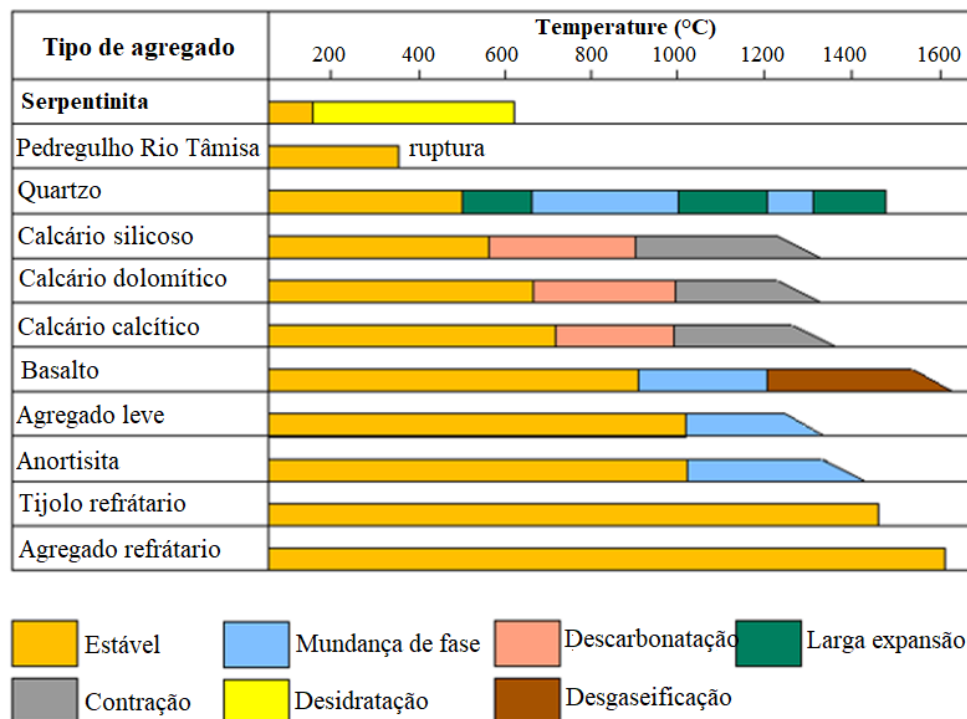


Figura 8. Comportamento de diversos agregados durante o aquecimento (adaptado de *fib*, 2007).

Nesse aspecto, apesar das significativas alterações físico-químicas que ocorrem na pasta de cimento, bem como do papel da água na mistura, a *fib* (2007) ressalta que em elevadas temperaturas são os agregados que podem realmente governar o comportamento térmico do concreto, quando este é considerado exclusivamente como um material compósito. As principais razões para formação dessa teoria se baseiam nas seguintes ponderações:

- os agregados geralmente ocupam volume significativo do concreto, entre 60% e 80% do volume de um concreto normal;

- as variações nas propriedades do agregado durante o aquecimento podem promover considerável efeito no desempenho do concreto em elevadas temperaturas. A condutividade térmica do concreto, por exemplo, é bastante influenciada pela natureza litológica do agregado;
- cada tipo de agregado reage de uma forma diferente em relação ao calor. O fator principal no comportamento do concreto aquecido é a estabilidade química e física do agregado;
- os agregados também são responsáveis por restringir as eventuais dilatações e contrações da pasta de cimento durante o aquecimento.

De maneira geral, o processo físico-químico do concreto, envolvendo a interação entre os agregados e a pasta de cimento, em situação de incêndio, pode ser simplificado conforme apresentado na Figura 9.

O que acontece com o aumento da temperatura?

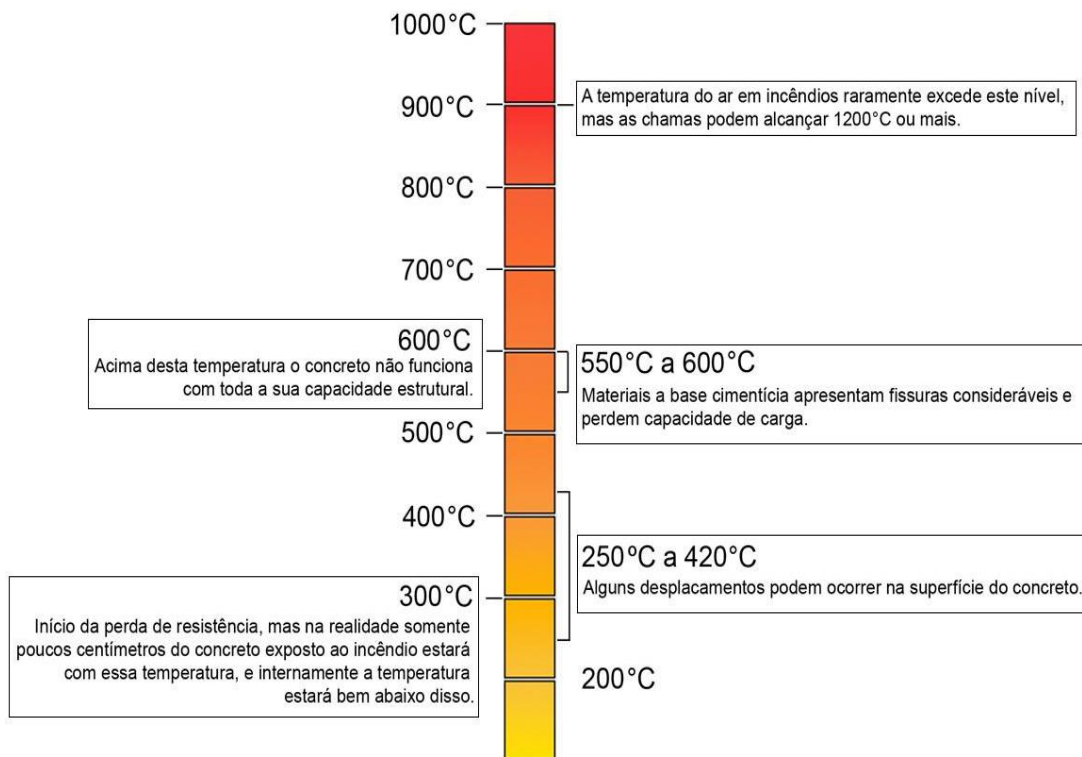


Figura 9. Processo físico-químico do concreto em situação de incêndio (adaptado de Jacobs, 2007).

Quanto ao concreto armado propriamente dito, Cánovas (1988) *apud* Costa (2008) observa que, após os 100°C, a redução da aderência entre as barras de aço e o concreto pode ocorrer em função do aumento e duração do aquecimento, e que, acima dos 600°C, pode haver a perda significativa da aderência. Destaca-se que as alterações microestruturais nas barras de aço não fazem parte do escopo deste artigo, mas podem ser consultadas em outras referências, a saber: Holmes et al. (1982), Cabrita Neves, Rodrigues & Loureiro (1996) e Purkiss (1996).

2.5 Deslocamento do concreto em elevadas temperaturas (*spalling*)

O termo *spalling* é internacionalmente conhecido e padronizado nos principais códigos e pesquisas internacionais. O fenômeno físico conhecido como *spalling* (Figura 10) pode ser definido como sendo o explosivo, e para alguns até denominado de violento/explosivo, deslocamento de camadas ou pedaços de concreto da superfície de um elemento estrutural quando exposto a elevadas temperaturas e a rápidas taxas de aquecimento, ambas caracterizadas por um cenário de incêndio (fib, 2007).



Figura 10. Exemplo de *spalling* explosivo ocorrido em pilar de concreto de alta resistência $f_{ck} = 83 \text{ MPa}$ (Kodur et al., 2005).

É necessário esclarecer, no entanto, que o *spalling* não é um mecanismo de falha ou colapso estrutural do elemento. O fenômeno pode ser leve ou severo e, conseqüentemente, conduzir ou não a uma rápida perda de seção transversal, a qual poderia desencadear um mecanismo de colapso estrutural, como falhas tradicionais ocasionadas por compressão, flexão ou cisalhamento.

A extensão, a gravidade e a natureza da ocorrência de *spalling* podem ser muito variáveis e imprevisíveis. O fenômeno pode ser insignificante em quantidade e consequência, quando da ocorrência de pequenos sulcos pontuais; no entanto, pode ser grave e comprometer a resistência ao fogo do elemento, devido ao deslocamento de grandes porções de concreto, expondo a armadura e diminuindo a sua capacidade estrutural devido à respectiva redução da seção transversal.

Tendo em vista simplificar e classificar o fenômeno de *spalling*, a *fib* (2007) propôs o agrupamento do mesmo em seis categorias, a saber⁵:

- *spalling* de agregado;
- *spalling* explosivo;
- *spalling* superficial;
- *spalling* por delaminação;
- *spalling* de aresta e
- *spalling* pós-resfriamento.

De todas as categorias o *spalling* explosivo é considerado o mais grave e severo em situação de incêndio. Conforme discutido no *fib* (2007), esse tipo de *spalling* pode resultar em deslocamentos explosivos e subseqüentes de camadas de concreto, em geral, atingindo espessuras entre 25 e 100 mm, dependendo de cada caso específico.

Segundo Khoury & Anderberg (2000) e a *fib* (2007), a ocorrência de cada tipo de *spalling* é influenciada por diversos fatores, dos quais se destacam a resistência, a idade, o tipo e o tamanho dos agregados, o teor de umidade e a permeabilidade ao vapor de água do material; a temperatura máxima e a taxa de aquecimento das ações térmicas; a forma e tamanho da seção transversal, a presença de fissuras, a taxa de aço, o arranjo (configuração) das armaduras, a presença de fibras de polipropileno e a intensidade de carregamento do elemento estrutural. A influência desses fatores pode ser observada resumidamente no Quadro 1⁶.

⁵ Os termos nas seis categorias propostas pelo *fib* (2007) foram interpretados e traduzidos pelo autor desse artigo.

⁶ Alguns termos da tabela original proposta pelo *fib* (2007) foram interpretados e traduzidos pelos autores deste artigo.

Quadro 1. Diferentes categorias de *spalling* e seus respectivos agentes influenciadores (*fib*, 2007).

Classificação do <i>spalling</i>	Tempo de ocorrência (probabilístico)	Natureza	Aspectos sonoros	Gravidade	Influências principais*
Agregado	entre 7 e 30 minutos	fendilhamento/rachaduras	pequenos estalos (tipo pipocamento)	superficial	H, A, S, D W
Aresta	entre 30 e 90 minutos	não violento	nenhum	pode ser severa	T, A, Ft, R
Superficial	entre 7 e 30 minutos	violento	tipo ocorrência de rachaduras / rangidos	pode ser severa	H, W, P, Ft
Explosivo	entre 7 e 30 minutos	violento	estrondos/explosões altas	severa	H, A, S, Fs, G, L, O, P, Q, R, S, W, Z
Delaminação	quando o concreto torna-se friável (perde capacidade resistente)	não violento	nenhum	pode ser severa	T, Fs, L, Q, R
Pós-resfriamento	durante e após o resfriamento por absorção de umidade	não violento	nenhum	pode ser severa	T, Fs, L, Q, R, W1, AT

*Foram preservadas as siglas utilizadas no documento original (*fib*, 2007), de acordo com a legenda a seguir para evitar confusões com siglas já utilizadas no idioma nacional (do Brasil).

Legenda:

A = expansão térmica do agregado, D = difusividade térmica do agregado, Fs = tensão de cisalhamento do concreto, Ft = tensão de tração do concreto, G = idade do concreto, H = taxa de aquecimento, L = carga/restrrição, O = perfil de aquecimento, AT = tipo de agregado, P = permeabilidade, Q = formato (geometria) da seção transversal, R = armadura, S = tamanho do agregado, T = temperatura máxima, W = teor de umidade, Z = tamanho da seção transversal, W1 = absorção de umidade.

2.5.1 *Spalling* no concreto de alta resistência

Quando se trata de concreto de alta resistência submetido a elevadas temperaturas, é dada uma atenção especial ao fenômeno de *spalling* do tipo explosivo. Esse tipo de *spalling* é teoricamente originado pela formação de pressão de vapor de água nos poros no interior de uma massa de concreto durante seu aquecimento.

Segundo Kodur et al. (2005), o concreto de alta resistência é mais suscetível a essa formação de pressão de vapor de água, devido principalmente a sua baixa permeabilidade ao vapor de água, quando comparado ao concreto de resistência normal.

Observa-se, no entanto, que a teoria bastante difundida na literatura internacional é baseada nos estudos precursores de Shorter & Harmanthy (1965) *apud fib* (2007) e internacionalmente conhecida por “*moisture clog model*” ou *modelo de bloqueio da umidade*⁷. De acordo com essa teoria, a pressão de vapor de água extremamente alta no interior da massa de concreto, gerada durante exposição ao fogo, não consegue ser extravasada devido à baixa permeabilidade do concreto de alta resistência.

Segundo Kodur et al. (2005), aos 300°C essa pressão pode alcançar valores iguais ou superiores a 8MPa, sendo altos para serem resistidos pelos concretos de alta resistência que tem uma resistência à tração, em geral, da ordem de 5MPa a 7MPa.

⁷ Esse termo foi traduzido e sugerido pelos autores deste artigo com base nos conceitos técnicos apresentados na teoria original de Shorter & Harmanthy (1965) *apud fib* (2007).

Em concordância com a teoria formalizada por Shorter & Harmanthy (1965) *apud fib* (2007), as extensas pesquisas realizadas por Phan (2002) mostraram que a ocorrência do *spalling* explosivo estava realmente relacionada à inabilidade de certos concretos de alta resistência em extravasar a pressão interna, procedente da água livre e da água quimicamente combinada que são vaporizadas com a elevação de temperatura no interior da massa de concreto.

Em seus experimentos, Phan (2002) observou que uma alternativa para minimizar os efeitos de formação de pressão interna no concreto pode ser concebida através da introdução de fibras de polipropileno nas misturas de concreto, onde tal fato foi comprovado em extensa pesquisa envolvendo corpos-de-prova de alta resistência. Foi possível caracterizar o comportamento do concreto de alta resistência quanto aos aspectos de formação de pressão interna, sendo considerado equivalente ao concreto de resistência normal, quando em elevadas temperaturas, simplesmente pelo fato da introdução de fibras de polipropileno.

Esse fato foi constatado através do estudo da pressão no poro (poro-pressão) exercida nesses dois tipos de concreto (normal e de alta resistência), procedente das elevadas temperaturas que podem ser alcançadas em um incêndio, conforme apresentado na Figura 11 (Phan, 2002).

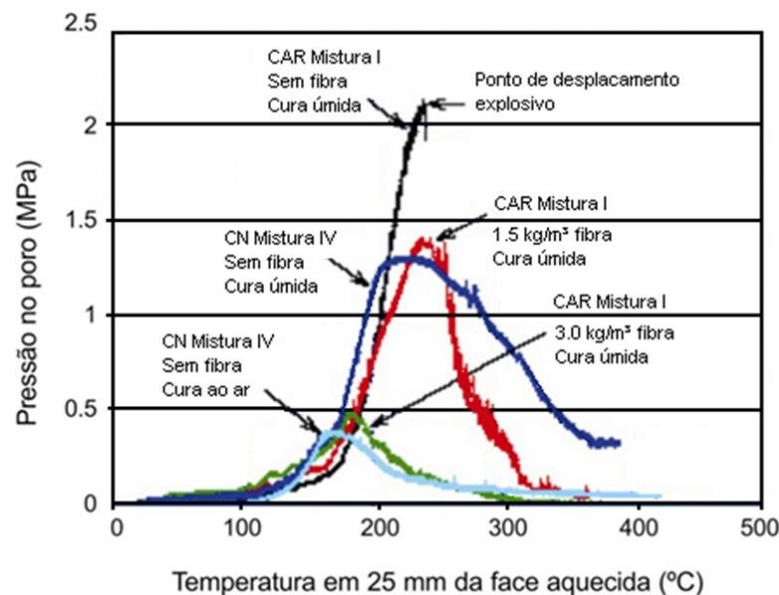


Figura 11. Pressão equivalente dos dois tipos de concreto (CN: normal e CAR: alta resistência), com introdução de fibras de polipropileno no concreto de alta resistência (em elevadas temperaturas) (Phan, 2002).

No entanto, Phan (2002) destacou que existem incoerências significativas quando associadas somente à formação de pressão no poro com o fenômeno de *spalling* explosivo, principalmente pelo fato de existirem outros fatores fundamentais que podem influenciar nos programas experimentais em geral. Somente a introdução de fibras de polipropileno não necessariamente garante a integridade do concreto frente a elevadas temperaturas, podendo haver outros agentes influenciadores, como por exemplo, o próprio tipo e dimensões da amostra (corpos-de-prova ou elementos estruturais).

2.5.1.1 O efeito da presença de armadura (concreto armado)

Os estudos experimentais conduzidos pelo Professor Ph.D. Venkatesh Kodur⁸, quando ainda vinculado ao *NRC-CNRC National Research Council Canada*, repercutiram bastante na área de

⁸ Atualmente, o professor Ph.D. Venkatesh Kodur está vinculado ao *Center on Structural Fire Safety and Diagnostics* do *Department of Civil & Environmental Engineering* da *Michigan State University*.

pesquisa e desenvolvimento, principalmente, do concreto de alta resistência em situação de incêndio.

Kodur et al. (2000) ensaiaram pilares, sob carregamento, de concreto normal e de concreto de alta resistência com seção transversal de 305mm x 305mm e altura de 3810mm. Os pilares de concreto normal possuíam 34MPa e os de alta resistência 83MPa, ambos aos 28 dias de idade.

Em extenso programa experimental, Kodur et al. (2000) destacaram algumas diretrizes inovadoras envolvendo elementos estruturais, submetidas a ensaios de resistência ao fogo, as quais contribuíram consideravelmente para um melhor desempenho do concreto de alta resistência em situação de incêndio. As principais diretrizes basearam-se em procedimentos adotados para o confinamento dos pilares, conforme discutido a seguir.

A principal recomendação diz respeito ao arranjo (configuração) das armaduras transversais (estribos) com um travamento (confinamento) em forma de gancho a 135° na aresta do elemento e a respectiva redução no espaçamento dos estribos, a qual corresponde a aproximadamente 0,75 vezes do requerido usualmente no concreto normal. As modificações propostas por Kodur et al. (2000) e também resumidas em Kodur et al. (2005) podem ser observadas na Figura 12.

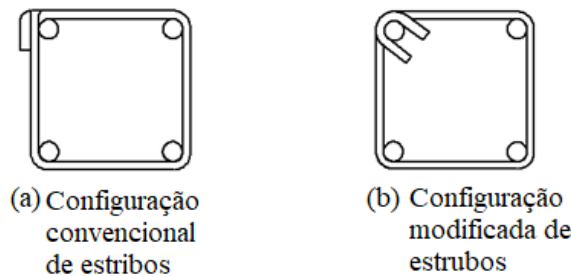


Figura 12. Configuração da armadura da seção transversal convencional (estribos) de um pilar de concreto de alta resistência (a) e configuração modificada para melhor (b) (Kodur et al., 2005).

O resultado positivo da proposta de Kodur et al. (2005) é evidente quando observados os dois elementos de concreto de alta resistência da Figura 13, após os respectivos experimentos de verificação de resistência ao fogo, realizados sob as mesmas condições de ensaio e de materiais. É importante frisar também que nessas amostras não houve adição de fibras de polipropileno na mistura de concreto, apenas a modificação no arranjo (configuração) das armaduras (indicada na Figura 12).

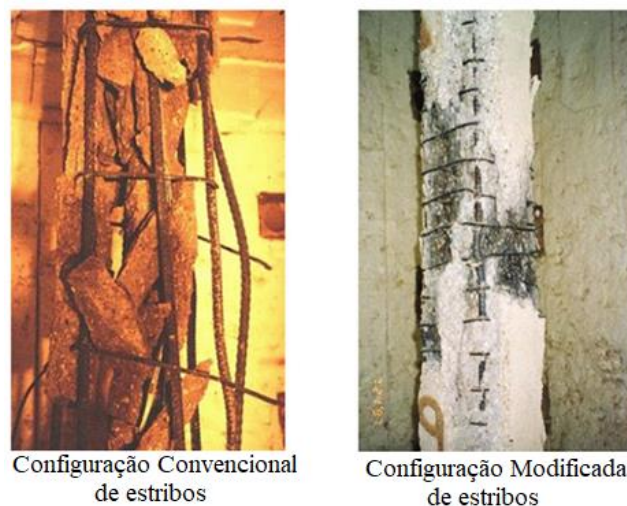


Figura 13. Resultados obtidos após o ensaio em elevadas temperaturas, sendo (a) configuração convencional da armadura de pilares de alta resistência e (b) a configuração modificada para melhor (Kodur et al., 2005).

Em suma, segundo Kodur et al. (2005), o concreto de alta resistência pode, realmente, ser mais suscetível ao fenômeno de *spalling* quando comparado ao concreto de resistência normal, sendo esse fato mais recorrente para resistências acima do patamar de 70 MPa. No entanto, esse fenômeno pode ser substancialmente minimizado quando algumas diretrizes são adotadas. Conforme observado por Kodur et al. (2000), o teor de umidade do concreto, o tipo de agregado e o tamanho da seção transversal do elemento também são relevantes, além da proposta anterior de modificação na armadura transversal. Destacam ainda que, na prática, quanto maior o teor de umidade da mistura de concreto, mais intenso e severo o fenômeno de *spalling*.

2.5.1.2 O efeito da idade

Morita et al. (2002) realizaram extensa pesquisa para avaliar dois parâmetros: (a) a influência da relação água/cimento na intensidade de *spalling* e (b) a influência de diferentes configurações de armadura dos elementos de concreto de alta resistência armados para minimização do efeito de *spalling*, com e sem adição de fibras de polipropileno na dosagem.

Para avaliar a influência da relação água/cimento na intensidade de *spalling*, foram experimentados vários tipos de elementos de concreto (com diferentes relações a/c), sempre com duas idades distintas: com dois meses e com um ano; sem variação das dimensões do elemento estrutural (70cm x 70cm x 140cm) e da espessura de cobrimento da armadura (5cm). A simulação de incêndio foi realizada de acordo com as prescrições da curva padrão ISO 834 em um período predeterminado de 180 minutos (3h).

Na Figura 14 é possível observar a considerável diferença em função da idade do elemento de concreto para valores de relação água/cimento equivalentes (exemplo para: $a/c = 0,375$ e $a/c = 0,449$).

O experimento conduzido por Morita et al. (2002) parece contribuir para evidenciar o quanto podem ser limitadas as pesquisas realizadas para avaliação do grau de *spalling* em elementos de concreto em idades prematuras, pois a ocorrência desse tipo de fenômeno depende significativamente do fator tempo (idade da amostra).

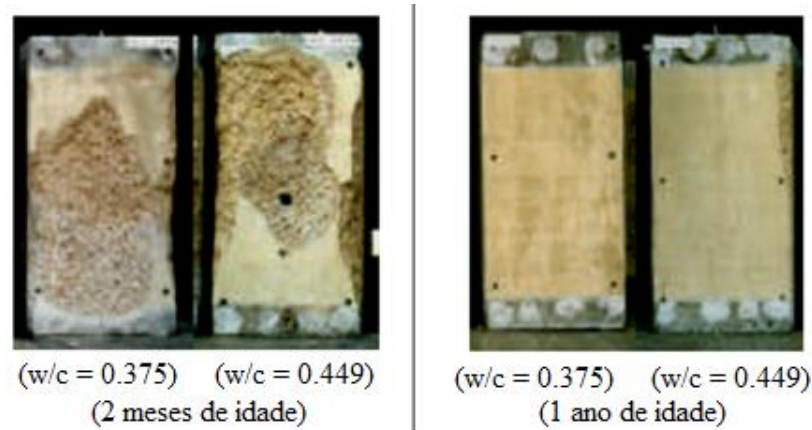


Figura 14. Pilares de concreto armado após o experimento de simulação de incêndio (180min): efeito da relação água/cimento e da idade, na ocorrência do fenômeno de *spalling*, seção transversal quadrada de lado 70cm (Morita et al., 2002).

Recentemente no Brasil (Britez, 2011), foi realizado um experimento envolvendo um pilar de grandes proporções, protótipo dos pilares de concreto armado colorido de alta resistência do edifício *e-Tower* – recorde mundial em resistência na época (Helene & Hartmann, 2003) –, com idade avançada de oito anos.

Na oportunidade, os resultados demonstraram que o concreto de alta resistência se comportou de forma íntegra (Figura 15) frente ao fogo, com 95% de sua área de seção transversal mantida após

o ensaio de simulação de incêndio (somente 5% reduzida efetivamente por efeito de *spalling*). Além disso, constatou-se nesse experimento que a utilização de pigmento a base de óxido de ferro (concreto colorido) atuou também como um excelente indicador colorimétrico (termômetro natural), auxiliando na avaliação da estrutura pós-incêndio.

O pilar experimentado (f_{ck} de 140 MPa) possuía seção transversal de 70cm x 70cm, 2 m de altura, espessura de cobrimento médio de 25mm; e foi ensaiado com três faces expostas a o fogo por um período de 180min (3h), sem carregamento, com simulação de incêndio caracterizada pela curva-padrão de aquecimento ISO 834 no Laboratório de Segurança ao Fogo do IPT, em São Paulo.

Além da idade avançada, Britez (2011) apontou que outros fatores podem ter contribuído positivamente para o bom desempenho do pilar, como o tipo de agregado graúdo empregado na dosagem original (basalto), bem como o tamanho da seção transversal e a configuração das armaduras da amostra.

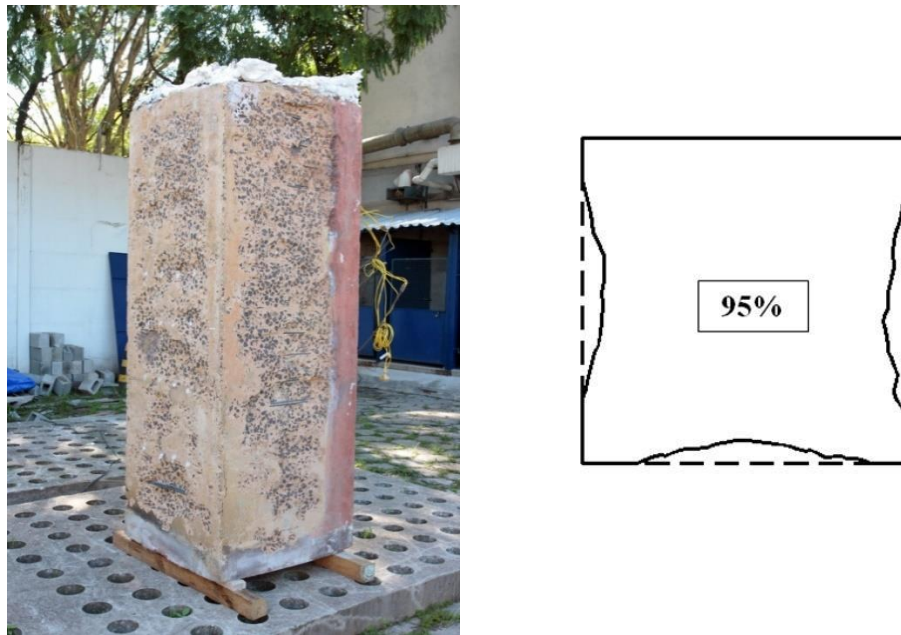


Figura 15. Integridade do pilar e detalhe da seção transversal preservada após 180min (3h) de ensaio (mostrando a pequena redução de seção transversal sofrida somente por efeito de *spalling*) (Britez, 2011).

2.5.1.3 O efeito da intensidade de carregamento

Apesar de importantes e normalizados, certamente, os ensaios realizados em **corpos-de-prova** (cúbicos ou cilíndricos) e até em **elementos estruturais** (pilares, vigas e lajes) de grandes proporções, com incrementos de carregamento e restrições, ainda não são suficientes para uma simulação real do comportamento do concreto quando inserido em um **sistema estrutural**, onde outros efeitos ocorrem durante um incêndio, como, por exemplo, as dilatações/alongamentos dos vínculos, as deformações e os deslocamentos generalizados de todos os elementos de concreto expostos ao fogo.

Por questões óbvias associadas aos custos envolvidos e à complexidade da realização desses tipos de experimentos, não é uma prática comum simular programas experimentais térmicos em uma edificação protótipo para avaliação de elementos estruturais. No entanto, um ensaio dessa natureza, na época bastante divulgado no meio técnico, foi realizado em setembro de 2001 no *Cardington Large Building Test Facility (LBTF)*⁹.

⁹ O *Cardington Large Building Test Facility (LBTF)* estava localizado no interior do *BRE's (Building Research Establishment) Cardington Laboratory* em *Cardington, Bedford*, aproximadamente 70 km ao norte de Londres, na

A edificação protótipo do projeto *Cardington* possuía sete pavimentos, uma altura total de 25,2m e ocupava uma área de 675m² distribuída em compartimentos quadrados de 7,5m x 7,5m, o que em planta formava um retângulo com quatro compartimentos em uma direção e três noutra. Uma perspectiva da edificação protótipo do projeto *Cardington* pode ser observada na Figura 16.



Figura 16. Perspectiva da estrutura protótipo em concreto armado concebida para o experimento de simulação de incêndio em *Cardington* (Chana & Price, 2003).

A edificação protótipo não possuía vigas e se caracterizava por um sistema de construção formado por pilares e por lajes planas e maciças, que possuíam espessura de 25cm, os pilares internos seção transversal quadrada de 40cm x 40cm e os de extremidade 40cm x 25cm. Os pilares possuíam espessura de cobrimento de 40mm e foram concebidos com uso de concreto de alta resistência ($f_{ck} = 103\text{MPa}$, aos 28 dias de idade), contendo agregados tipo calcário, adição de sílica e, ainda, adição de 2kg de fibra de polipropileno por metro cúbico de concreto.

Conforme descrito por Chana & Price (2003), a simulação de incêndio ocorreu em uma região ocupada por quatro compartimentos em uma área total de 225m² com altura de 4,25m (pé direito) no pavimento térreo da edificação. Intencionalmente, um pilar interno foi exposto nas quatro faces e alguns de extremidade parcialmente, conforme observado na planta da Figura 17. O experimento envolveu, também, aberturas de ventilação projetadas nas paredes externas dos compartimentos a serem incendiados, bem como a simulação de carregamento. As lajes foram uniformemente carregadas com sacos de areia para uma sobrecarga útil de 3,25kN/m² (325kgf/m²) e na região dos pilares foram posicionados sacos adicionais para simular um esforço axial de 925kN (92,5tf).

Inglaterra. O laboratório era uma área formada por um extenso hangar, o qual permite a realização de ensaios em uma altura útil de até 50m, em um ambiente protegido do vento (CHANA & PRICE, 2003).

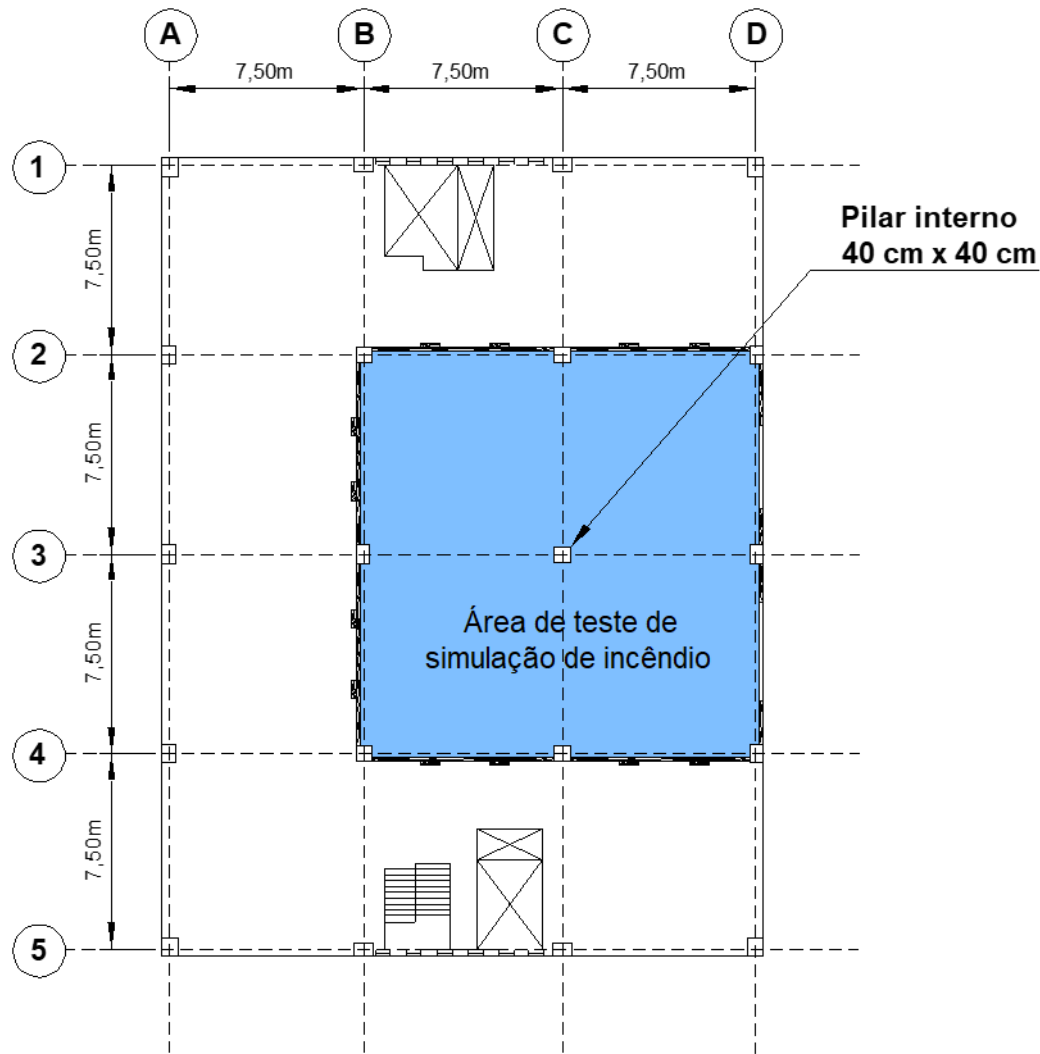


Figura 17. Planta da estrutura protótipo em concreto armado indicando a área submetida à simulação de incêndio (Chana & Price, 2003).

O incêndio foi simulado pela queima de material inflamável composto por estrados de madeira, posicionados nos compartimentos para produzir uma carga térmica de 40kg/m^2 (720MJ/m^2), compatível com uma carga de incêndio típica de escritórios comerciais, por exemplo.

Durante a simulação de incêndio, nos primeiros 10 minutos do experimento, houve a ocorrência de *spalling* de pequena intensidade, praticamente superficial caracterizado por um som discreto de “pipocamento”. No entanto, após este período e durante mais 15 minutos a intensidade foi bem maior, indicando um provável *spalling* do tipo explosivo, que posteriormente foi constatado principalmente nas superfícies das lajes (tetos) dos compartimentos em chamas, ($f_{ck} = 74\text{ MPa}$). Após 25 minutos, as ocorrências de *spalling* reduziram-se significativamente. A extensão e a severidade da ocorrência do fenômeno de *spalling*, após o experimento, podem ser observadas na Figura 18.



Figura 18. Detalhe da extensão e da severidade da ocorrência de *spalling* nas lajes ($f_{ck} = 74$ MPa) após a simulação de incêndio. No destaque, observar as condições de integridade do pilar de concreto de alta resistência ($f_{ck} = 103$ MPa) (Chana & Price, 2003).

Quanto ao aspecto de integridade do concreto de alta resistência, Chana & Price (2003) observaram que os pilares ($f_{ck} = 103$ MPa na oportunidade do ensaio) se comportaram satisfatoriamente, com ocorrência de *spalling* de pequena intensidade, mas desprezíveis do ponto de vista da segurança e estabilidade estrutural, mesmo considerando os efeitos do carregamento, vínculos, entre outros atributos normais de uma estrutura de concreto em estado de serviço. Complementaram ainda que, nesse caso específico, pode ter havido também a contribuição positiva da adição de fibras de polipropileno na dosagem do concreto (nos pilares).

Os pesquisadores também concluíram que a integridade estrutural das lajes ($f_{ck} = 74$ MPa) foi mantida, apesar do *spalling* generalizado e das flechas de até 7,8cm, que não comprometeram a segurança, pois conforme observado, nenhuma laje colapsou e todas continuaram suportando as cargas distribuídas de 325kgf/m². Nesse contexto, ressalta-se que no caso das lajes maciças não foram introduzidas fibras de polipropileno na dosagem do concreto.

3. CONCLUSÕES

1. Considera-se que o texto, em geral, contribui potencialmente para desmistificar algumas crenças e dúvidas quanto ao fenômeno de ocorrência de *spalling*, uma das principais manifestações do material em elevadas temperaturas.
2. Dentro do enfoque de incêndios caracterizados por materiais a base celulose, mesmo de grande intensidade, em geral, pode-se concluir que uma estrutura de concreto armado comporta-se melhor que o observado em corpos de prova de pequenas dimensões, assim como elementos estruturais de dimensões maiores comportam-se melhor que elementos estruturais de pequenas dimensões, assim como elementos estruturais em ambiente seco e com idades avançadas são mais resistentes que os recém construídos e úmidos.
3. Apesar do cenário de uma estrutura de concreto incendiada ser muito desolador e causar fortes impressões negativas, à luz da engenharia, o problema pode ser mais estético do que estrutural. No entanto, evidentemente, a estrutura deve ser inspecionada e periciada por um profissional especialista qualificado, embasada por recursos técnicos e experimentais para caracterização apropriada das propriedades residuais da estrutura de concreto armado.
4. É difícil imaginar, em princípio, a decisão de demolição (pode ocorrer mais por comoção social ou por ausência de seguro do patrimônio) de uma estrutura de concreto armado que foi

submetida a elevadas temperaturas procedente de um cenário de incêndio. São muito mais comuns e recorrentes intervenções corretivas de reabilitação por reparos e reabilitações estruturais, desde que haja respaldo de uma perícia técnica detalhada, consentimento dos órgãos públicos correlatos e interesse do proprietário da edificação.

4. REFERÊNCIAS

- 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/structfire/DataBase/References/Concrete%20&%20Fire%203557%20lo%20res.pdf>. Acesso em: nov. 2007.