

Patologia e Recuperação das Estruturas Incendiadas

23/7/2007

Estruturas Incendiadas

1

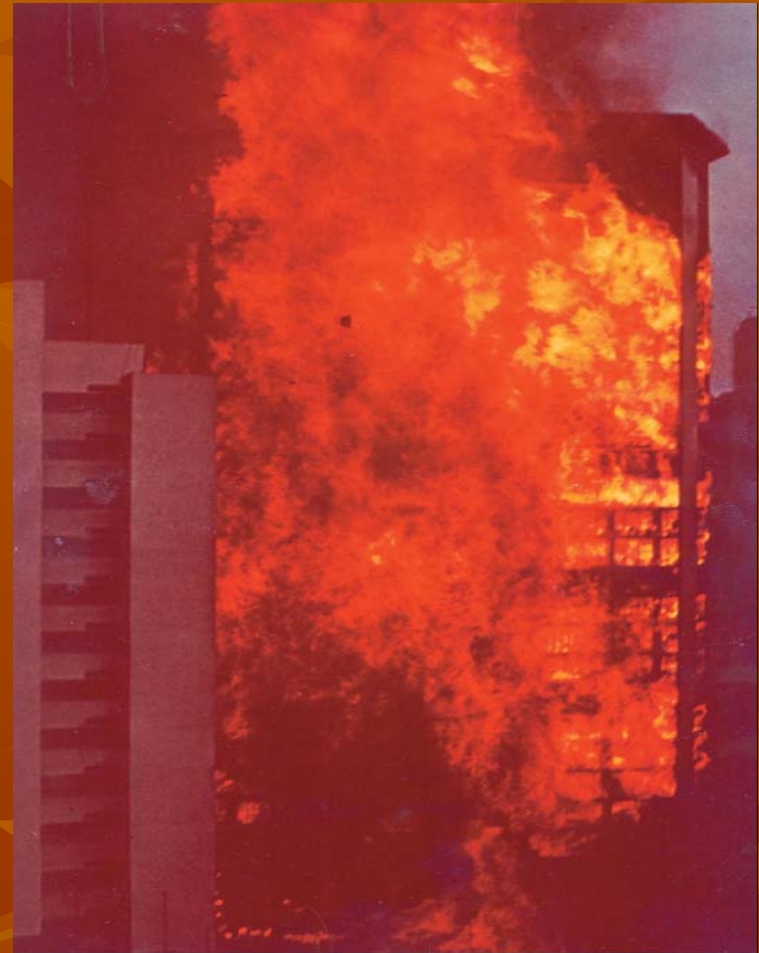
Principais incêndios em edifícios altos no Brasil

Edifício Andraus

Ocorrido em SP em 24/02/72

O edifício continha 31 pavimentos de escritórios e lojas. O incêndio atingiu todos os andares. Houve 6 vítimas fatais e 329 feridas.

O ponto de origem foi no 4º pav., em virtude da grande quantidade de material depositado.



Edifício Joelma

Ocorrido em SP em 1/02/74

O edifício continha 25 pav de escritórios e garagens.

O incêndio atingiu todos os pav. Houve 189 vítimas fatais e 320 feridas.

A causa possível foi um curto-circuito.



Edifício Grande Avenida

Ocorrido em SP em 14/02/81
Pela segunda vez. O incêndio
atingiu 19 pavimentos.
Houve 17 vítimas fatais e 53
feridas.
A origem foi no subsolo.



Edifício Cesp

Ocorrido em SP em 21/05/87
O conjunto tinha dois blocos,
um com 21 pavimentos e
outro com 27 pavimentos.

Houve propagação de
incêndio entre blocos e, em
decorrência, colapso da
estrutura com desabamento
parcial.



Causas do colapso

Nos edifícios de múltiplos andares, o colapso progressivo induzido por incêndio tem sido relacionado:

- às falhas nos sistemas de segurança e materiais de proteção passiva,
- à severidade do incêndio, em itens tais como taxa de aquecimento, extensão e duração,
- aos materiais estruturais em resistência, rigidez e ductilidade
- ao carregamento aplicado à estrutura e
- às características estruturais tais como o arranjo do sistema estrutural e sua capacidade de redistribuição de esforços (Scott *et al.* (2002)).

Segurança contra o incêndio – Proteção ativa

- A segurança contra incêndio é obtida pela integração dos sistemas de proteção ativa e passiva.
- A proteção ativa contra incêndio é constituída por meios, equipamentos e sistemas, que precisam ser acionados, quer manual, quer automaticamente, para funcionar em situação de incêndio. Ela visa a rápida detecção do incêndio, o alerta dos usuários do edifício para a desocupação e às ações de combate com segurança.
- São exemplos de meios de proteção ativa: sistema de alarme manual de incêndio (botoeiras); meios de detecção e alarme automáticos de incêndio (detectores de fumaça, temperatura, raios infravermelhos, ligados a alarmes automáticos); extintores, hidrantes, chuveiros automáticos (sprinklers), sistema de iluminação de emergência, sistemas de controle e exaustão da fumaça. (Ono (2004))

Segurança contra incêndio - Proteção passiva

- A proteção passiva contra incêndio é constituída por meios de proteção incorporados à construção da edificação, os quais não requerem nenhum tipo de acionamento para o seu funcionamento em situação de incêndio.
- São meios de proteção passiva: acessibilidade ao lote (afastamentos) e ao edifício (janelas e outras aberturas), rotas de fuga (corredores, passagens e escadas), adequado dimensionamento dos elementos estruturais para a situação de incêndio, compartimentação, definição de materiais de acabamento e revestimento adequados (Ono (2004)).
- Dentre as medidas de proteção passiva, o papel da compartimentação pode ser definido sob diversas óticas, por estar relacionado a vários fatores, tais como: medidas urbanísticas (distância mínima de separação entre edificações), medidas arquitetônicas (dimensões e formas de espaços fechados, terraços e sacadas), função dos espaços compartimentados (áreas permanentes ou transitórias) e projeto estrutural em situação de incêndio.

Integridade e níveis de segurança

- Durante o sinistro, a integridade estrutural do edifício, bem como a segurança dos seus ocupantes e das ações de combate ao incêndio, dependem dentre outras, da qualidade do projeto estrutural.
- Quando o projeto estrutural apresenta um fator razoável de segurança, o elemento estrutural pode assegurar uma estabilidade aceitável durante um período preestabelecido pela legislação, em função do projeto.
- Os níveis de segurança de um projeto estrutural são estabelecidos pela legislação e pela normatização. Em face do comportamento do material aquecido, o fator razoável de segurança deve compreender os efeitos da ação térmica no concreto armado.

Concreto

23/7/2007

Estruturas Incendiadas

11

Heterogeneidade do concreto

- O concreto é um material heterogêneo, composto por partículas de agregados dispersos em uma matriz de cimento e que se comporta como um material único à temperatura ambiente.
- A heterogeneidade do concreto é evidenciada quando exposto a temperaturas elevadas, pois cada componente reage diferentemente ao calor. Enquanto o agregado se expande até desestruturar-se quimicamente, a pasta de cimento apresenta expansão volumétrica somente a temperaturas um pouco mais baixas, apresentando uma contração, acima dos 300 °C (Taylor (1997)).
- As deformações diferenciais entre os componentes e as reações físico-químicas do concreto endurecido, conduzem à desagregação do concreto armado (Tabela 2.1 e Figura 2.1).
- Os carregamentos aplicados à estrutura participam do processo de deterioração, por meio de fissurações excessivas e lascamentos.

Efeitos térmicos

Temperatura (°C)	Efeito térmico
■ 100 °C	- Evaporação da umidade livre, sem redução da resistência do concreto.
■ 200 °C	- Resistência residual de compressão compreendida entre 80 e 90%.
■ 300 °C	- Decomposição dos silicatos hidratados; resistência residual de compressão de 70%.
■ 500 °C	- Desidratação da etringita; resistência residual de compressão entre 30 e 40%.

Tabela 2.1: Efeitos térmicos sobre o concreto submetido à temperaturas elevadas (Branco & Santos (2000)).

Temperaturas de Decomposição

A reação do cimento com a água leva à formação de produtos hidratados, entre os quais se encontram aluminatos de cálcio hidratados, hidróxido de cálcio e etringita.

Estes produtos são sensíveis ao aumento da temperatura, decompondo-se em, aproximadamente, 285 °C, 460 °C a 485 °C e 130 °C, respectivamente.

Em uma pasta de cimento hidratada é possível identificar, ainda a presença de carbonato de cálcio, correspondente ao calcário adicionado ao cimento ou decorrente da carbonatação do concreto. Este composto desintegra-se a temperaturas mais elevadas, da ordem de 680 °C a 750 °C.

Deste modo o concreto, ou seja, sua pasta hidratada, é um material que se deteriora a temperaturas relativamente elevadas, como podem ser aquelas atingidas durante um episódio de incêndio.

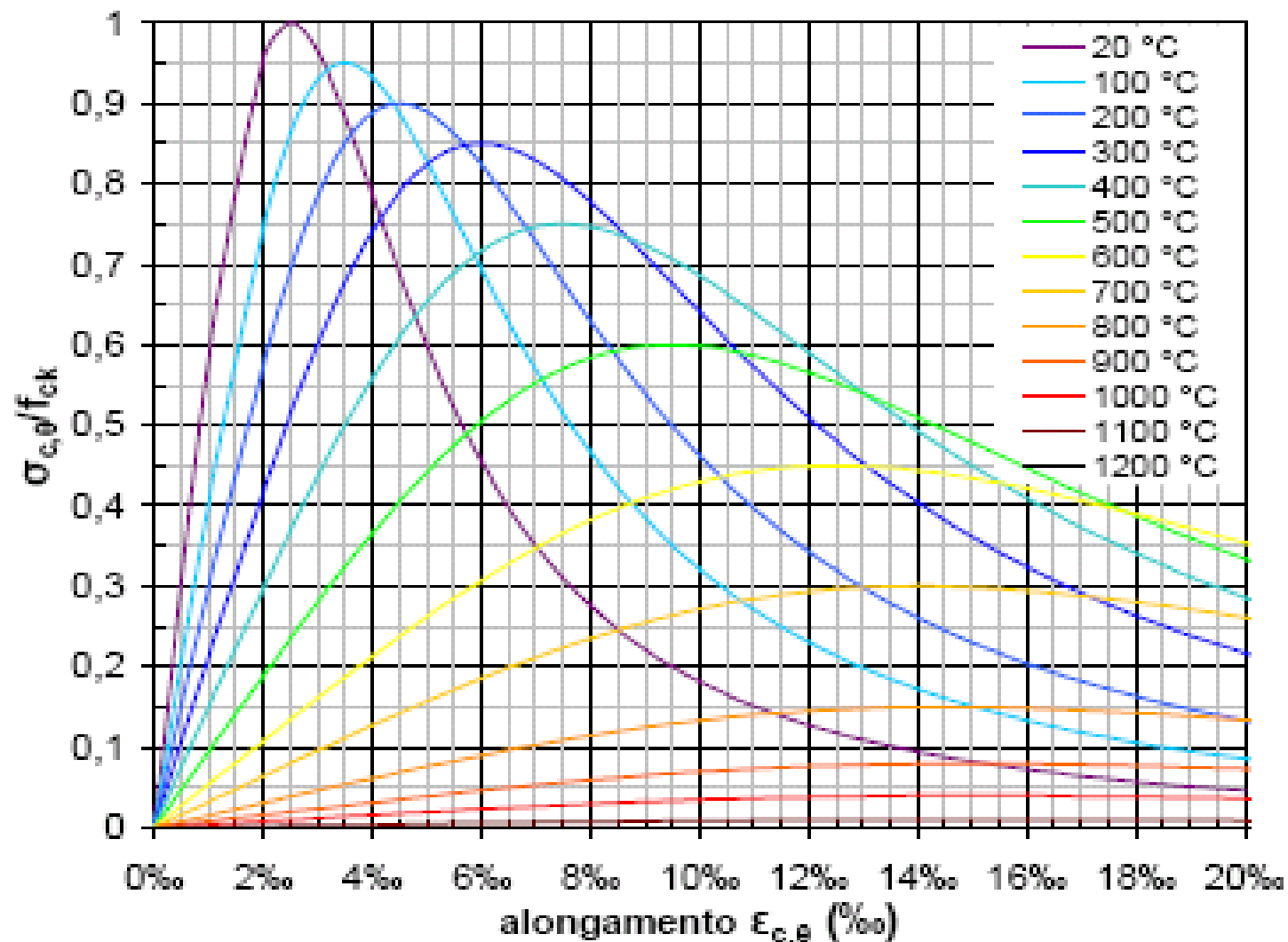


Figura 2.1: Diagrama tensão x deformação do concreto em altas temperaturas (prEN 1992-1-2 (2002)).

Lascamentos

- Costa *et al.* (2002a) descrevem os diversos fatores determinantes dos lascamentos e, dentre eles, a pressão interna de vapor parece desempenhar o papel dominante.
- A umidade interna presente na microestrutura condensa-se e tende evaporar, gerando pressões internas de vapor. Os lascamentos acontecem como meio de liberação do vapor quando a microestrutura não apresenta poros suficientes para o transporte da umidade condensada.
- O perigo reside na imprevisibilidade e violência dos lascamentos em concretos muito saturados ou em concretos de baixa permeabilidade, como os CAR (Costa *et al.* (2002a), Nince *et al.* (2003)).

Delaminação das camadas superficiais

- O esfarelamento da superfície calcinada e o lascamento (“*spalling*”) são as formas de desagregação do concreto quando submetido a temperaturas elevadas.
- O primeiro, característico da exposição constante das camadas superficiais do material à ação térmica, enfraquece o concreto e reduz em muito a resistência a abrasão levando ao esfarinhamento da superfície das peças de concreto.
- O segundo é o desprendimento de uma porção considerável do concreto endurecido da superfície do elemento (Ferreira (1988)).
- O lascamento pode acontecer de duas formas (Purkiss (1996)): explosivo (“*explosive spalling*”), cuja perda do material é parcial, instantânea e violenta com grande liberação de energia, formando grandes cavidades nos primeiros 30 minutos do incêndio; delaminação gradual (“*sloughing*”) de grande extensão (perda geral do material) e de efeito progressivo, pois libera novas camadas de concreto à exposição das chamas, conduzindo a novos descascamentos sucessivos e a perda de aderência entre a armadura e o seu cobrimento (Ferreira (1988), Melhado (1988)).
- É sabido que a maior incidência de “*spalling*” ocorre entre 250 °C e 400 °C, temperaturas normalmente alcançadas em situação de incêndio (Kalifa *et al.* (2000)). Na maioria dos casos a pressão de vapor é o fator de maior influência, sobretudo nos lascamentos explosivos (Anderberg (1997), Kalifa *et al.* (2000)).

Características Físicas

- Neville (1997) descreve queda acentuada da resistência à compressão do concreto quando submetido a temperaturas superiores a 300 °C, o mesmo acontecendo com o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão.
- Também o aumento de temperatura sobre o concreto é acompanhado por mudança de sua coloração, que passa a rosado ou vermelho, após exposição a temperaturas entre 300 °C e 600 °C, cinza entre 600 °C e 900 °C e laranja amarelado entre 900 °C e 1000 °C.
- Colorações além do rosado já sugerem comprometimento da qualidade do concreto.

Alteração de cor

- Pequenas quantidades de óxido de ferro, hidróxidos ou óxidos de ferro hidratados são responsáveis por alterações na cor dos agregados com o crescimento da temperatura.
- As rochas sedimentares, metamórficas e ígneas geralmente não alteram a cor, quando submetidas a incêndios ordinários (Lin *et al.* (1996)).
- Quando a mudança de cor acontece, rochas calcáreas podem tomar a coloração rósea entre 230 °C e 300 °C. A tonalidade vai escurecendo gradualmente com a elevação da temperatura chegando a aparentar vermelho-marrom aos 600 °C.
- Depois, torna-se cinza e por último, amarelo-claro quando a temperatura se aproxima dos 900 °C.
- Algumas rochas metamórficas também podem apresentar mudanças de cor com a temperatura tal como as rochas sedimentares carbonáticas apresentam (Lin *et al.* (1996)).

Pasta de cimento Portland (1)

- Entre 4 e 80 °C, os produtos de hidratação do cimento Portland comum permanecem quimicamente estáveis. As alterações na pasta de cimento são essencialmente físicas como: porosidade, crescimento de fissuras e energia de superfície.
- A expansão térmica da pasta de cimento aumenta linearmente com a temperatura até 100 °C, quando toda água livre é evaporada (Minami *et al.* (1987, 1991)). A pasta começa perder a estabilidade dos 100 aos 200 °C. Pode-se considerar, em suma, que a desestruturação química efetiva da pasta de cimento se inicia a partir dos 180 °C (Kalifa *et al.* (2000)), pois, após os 100 °C, as fissuras surgem na microestrutura, inicialmente pela contração da própria pasta, provocada pela perda de água contida no sistema de poros (Barragan *et al.* (2000)).
- Acima dos 200 °C ocorre uma leve reação físico-química: a água evaporada reduz as forças de Van der Waals entre as camadas de C-S-H. A perda parcial da adesão química acentua o aparecimento de fissuras e uma ligeira perda de resistência, persistindo até 300 °C (Neville (1997)).
- As microfissuras na zona de transição colaboram principalmente na redução da resistência à flexão e do módulo de elasticidade do concreto endurecido. Enquanto aos 204 °C, o módulo de elasticidade apresenta 70% a 80% do seu valor inicial, aos 427 °C ele apresenta 40% a 50% (Neville (1997)).

Pasta de cimento Portland (2)

- Uma série de reações na pasta de cimento endurecida ocorrem entre 400 e 600 °C: dessecação dos poros, seguida da decomposição dos produtos de hidratação e destruição do gel de C-S-H. A reação endotérmica da desidratação do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 libera o óxido de cálcio CaO e água, sendo esta última evaporada, conforme expressão abaixo. Essas reações químicas são acompanhadas de redução de volume, contribuindo para o aumento de fissuras (Grattan-Bellew (1996)).



- O resfriamento rápido por água, na ação de combate ao incêndio produz uma reidratação destrutiva da cal, porque o óxido de cálcio, entrando em contato com a água, sofre uma expansão abrupta e pode causar danos adicionais ao concreto endurecido, levando a desagregação após o incêndio.
- A adição de pozolanas à pasta pode ser benéfica por retirar o hidróxido de cálcio (Lin *et al.* (1996), Neville (1997)), mas é necessário incorporar fibras poliméricas para aliviar as pressões de vapor, comuns em pastas pozolânicas, impedindo uma desagregação precoce e explosiva do concreto.
- A deformação na pasta de cimento torna-se relativamente grande quando a temperatura interna do corpo de prova aquecido retorna à temperatura ambiente de 20 °C (Minami *et al.* (1987)).

A influência de adições de partículas reativas na pasta de cimento

- A adição de partículas ativas ultra-finas como sílica ativa, cinza volante, escória de alto-forno, pó de argila calcinada e pozolanas naturais ao cimento Portland melhoram as propriedades mecânicas com maior resistência e maior módulo de elasticidade e a durabilidade do concreto. A microestrutura do concreto torna-se mais compacta, menos porosa e menos permeável do que a microestrutura do concreto sem adições à pasta.
- Com o aumento da temperatura, a umidade livre na pasta é transportada na forma de vapor através dos poros do concreto em alta velocidade. Os lascamentos explosivos são susceptíveis entre 100 e 300 °C, quando a formação e liberação de vapor são muito intensas, mesmo sob baixas taxas de aquecimento (Noumowe *et al.* (1996), Saad *et al.* (1996)).
- Os elementos estruturais de concreto perdem massa com o aquecimento, em virtude da evaporação d'água. A perda de umidade corresponde a 7 % da massa total do concreto, sendo as maiores quantidades de água liberadas do concreto comum do que do CAR (Noumowe *et al.* (1996)).

Agregados (1)

- Quando o concreto é submetido à temperatura elevada, as tensões térmicas dentro do concreto são geradas na interface do agregado graúdo pela diferença de dilatações térmicas entre a argamassa e o próprio agregado graúdo. A intensidade das tensões térmicas são influenciadas pela forma geométrica e combinação dos agregados.
- A forma como as microfissuras aparecem e se propagam é influenciada pela intensidade dessas tensões e, por conseguinte, o enfraquecimento do concreto (Minami *et al.* (1987)). A diferença entre os coeficientes de expansão térmica da argamassa e dos agregados graúdos gera tensões térmicas microscópicas criando diferentes estados de fissuras microscópicas (Minami *et al.* (1987); Minami *et al.* (1991)). As fissuras podem ser controladas pelo uso de agregados de menor coeficiente de expansão térmica.

Agregados (2)

Os agregados ao serem aquecidos sofrem expansões que, dependendo da taxa de aquecimento e tamanho do agregado podem ser destrutivas para o concreto (Metha & Monteiro (1994)). Isso ocorre porque os agregados compõem cerca de 70% do concreto (Grattan-Bellew (1996)).

O aumento no volume dos agregados em razão da expansão térmica produzem “*pop outs*” (pipocamentos) e “*spalling*” (lascamentos) no concreto (Lin *et al.* (1996)). A composição mineralógica dos agregados governa a dilatação térmica diferencial entre a pasta e os agregados e conseqüentemente, a resistência última da zona de transição (Metha & Monteiro)

A natureza dos minerais nos agregados é preponderante no valor da condutividade térmica do concreto endurecido: o basalto, baixa condutividade; os calcários calcítico e dolomítico possuem condutividade média e o quartzo, condutividade mais elevada. A condutividade térmica é a propriedade térmica do concreto que mede a capacidade do material conduzir o calor.

Análoga à condutividade, a difusividade térmica no concreto também é diretamente influenciada pelo tipo de agregado: basalto, granito, calcáreo e quartzito conduzem, respectivamente, a concretos com difusividade crescente. A difusividade mede a velocidade da variação de temperatura no interior da massa (Neville (1997)).

Água

- A água absorvida pelo concreto endurecido em virtude do ambiente é evaporada entre 65 °C e 80 °C e a água livre nos interstícios do concreto, entre 80 °C e 100 °C.
- Em altas temperaturas, a dilatação térmica da água influencia o processo de lascamentos do concreto por meio dos gradientes de pressão associados à vaporização e transporte de grandes quantidades de água (Kalifa *et al.* (2000)).
- 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 transferência de massas por evaporação da água e liberação de ar incorporado e, conseqüentemente, no aumento das trincas decorrentes da contração da pasta.
- Por essas razões, o excesso de água livre contribui na desagregação acelerada da pasta.

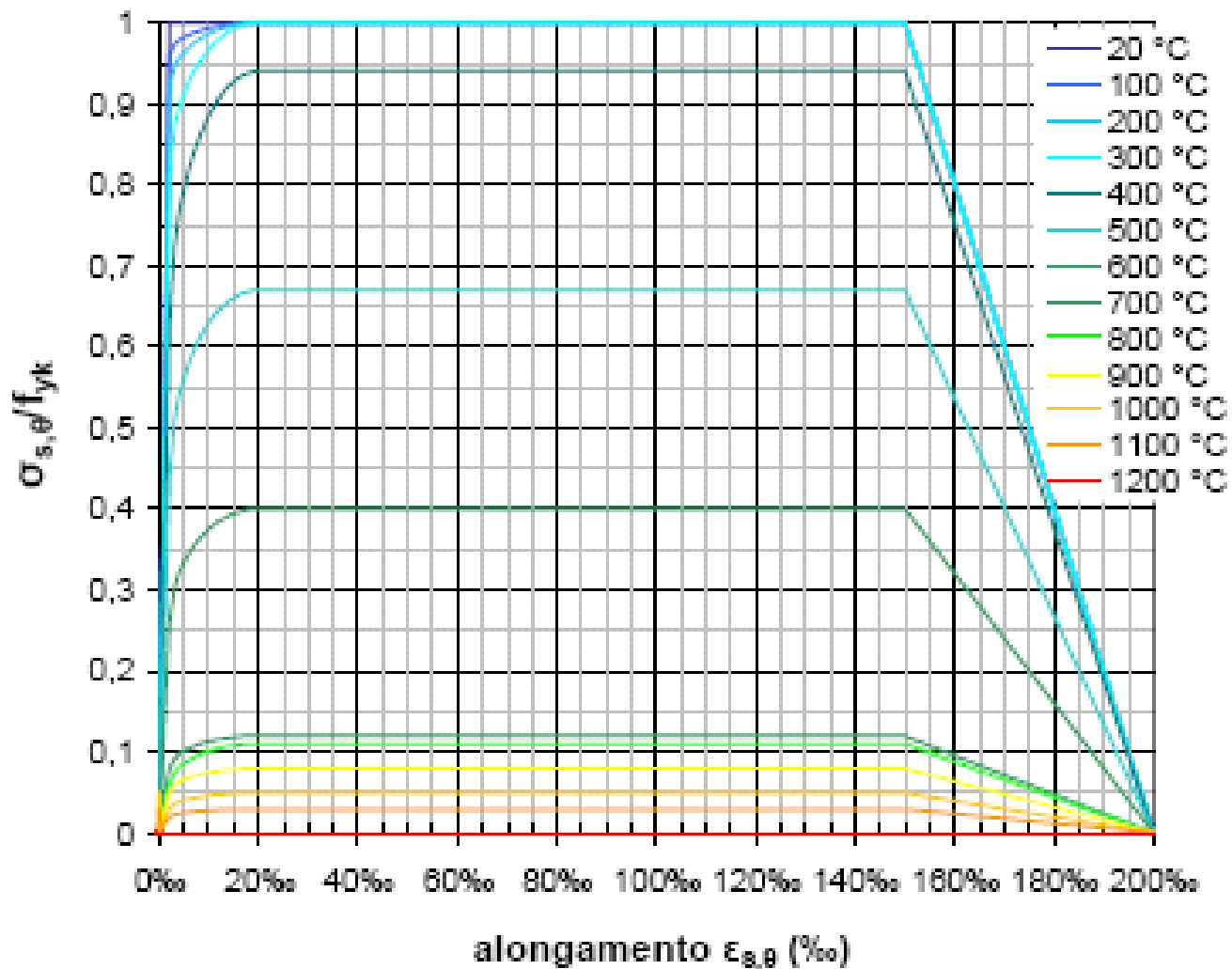
Armaduras

Danos sobre as armaduras

- Os incêndios de materiais celulósicos, típicos dos edifícios residenciais e comerciais, normalmente não chegam a temperaturas que possam causar a fusão do aço, mas apresentam temperaturas suficientes para aquecer a região periférica da estrutura de concreto, a ponto de reduzir, significativamente, a resistência do aço.
- Em face da baixa condutividade térmica do concreto, os efeitos da ação térmica ficam circunscritos às camadas externas dos elementos estruturais (Branco & Santos (2000)), onde as armaduras de aço estão alojadas.
- O desprendimento do cobrimento das armaduras, devido aos lascamentos, compromete o desempenho estrutural durante o incêndio, pois as armaduras ficam expostas ao calor excessivo.

Aço em alta temperatura

- Em altas temperaturas, o aço experimenta efeitos de fluência e de dilatação excessiva, além da redução da resistência e do módulo de elasticidade (Fig. 2.2).
- Outro aspecto importante é a redução da aderência entre as barras e concreto em função do aumento/duração do aquecimento. Aos 500 °C a aderência aço-concreto reduz à metade (Hertz (1982) e Schneider (1986) *apud* Buchanan (2001)).



o **Figura 2.2:** Diagrama tensão x deformação do aço laminado à quente em altas temperaturas (prEN 1992-1-2 (2002))

Aços durante o incêndio

- Os incêndios normalmente não chegam a temperaturas que possam causar a fusão do aço, aproximadamente 1550 °C. As máximas temperaturas alcançadas aproximam-se dos 1200 °C (Ferreira (1988)). A densidade do aço não é afetada pela temperatura e pode ser considerada constante $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$.
- O Eurocode 2 (ENV 1992-1-2 (2001)) admite que a resistência do aço se anula completamente aos 1200 °C. O módulo de elasticidade do aço é influenciado pela natureza do aço e tensões residuais. À medida que a temperatura se eleva, a taxa de redução é maior que a observada na resistência. A redução, nos aços laminados é linear até 400 °C e, a partir daí, decai acentuadamente (Weigler & Fisher (1964) *apud* ACI 216R-89 (1989)).
- As Fig. 2.3 e 2.4 mostram a redução da resistência e do módulo de elasticidade dos aços usados nas estruturas de concreto armado e do próprio concreto endurecido quando submetidos à temperatura elevada.

1. Laminados a quente

- Os aços de dureza natural, isto é, laminados a quente, são produzidos acima dos 700 °C sem nenhum tratamento após a laminação, Figueiredo *et al.* (2000)). Os aços laminados a quente ou aços “doces” apresentam patamar de escoamento bem definido e as propriedades elásticas dependem unicamente da composição química, teores de carbono, manganês, silício e cromo, apresentando grande ductilidade. Eles não perdem as propriedades de resistência quando aquecidos até 1100 °C ou 1200 °C e resfriados em seguida.
- Por isso, as armaduras de aço laminados do concreto recuperam, virtualmente, a resistência em incêndios. Verifica-se um aumento de aproximadamente 30 % na resistência última nos aços laminados, entre 250°C e 400°C (Bauer (1994)). Depois, a resistência é progressivamente reduzida e o aço amolece em torno dos 800°C (Malhotra (1982)).

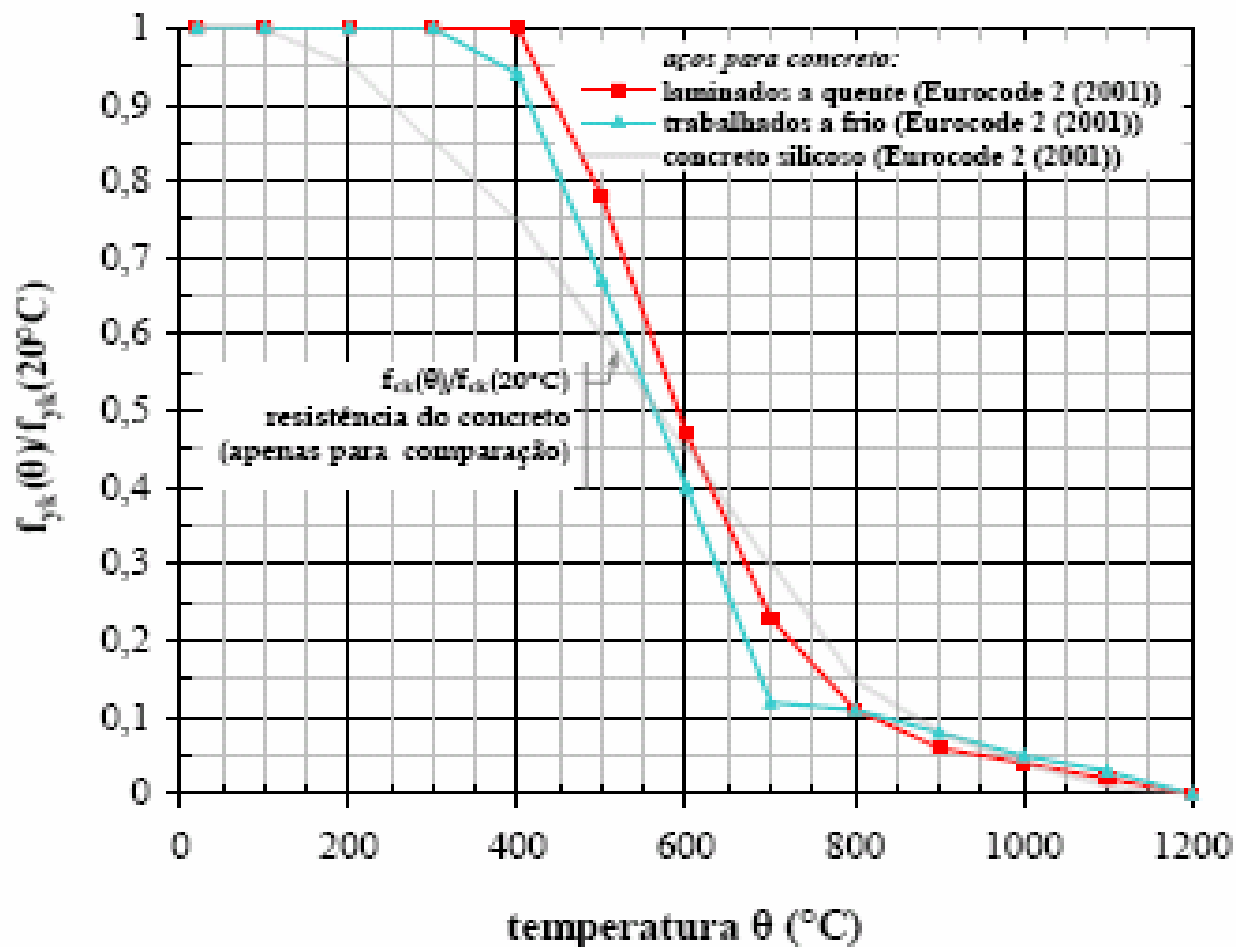


Figura 2.3: redução da resistência dos aços para concreto armado e do próprio concreto.

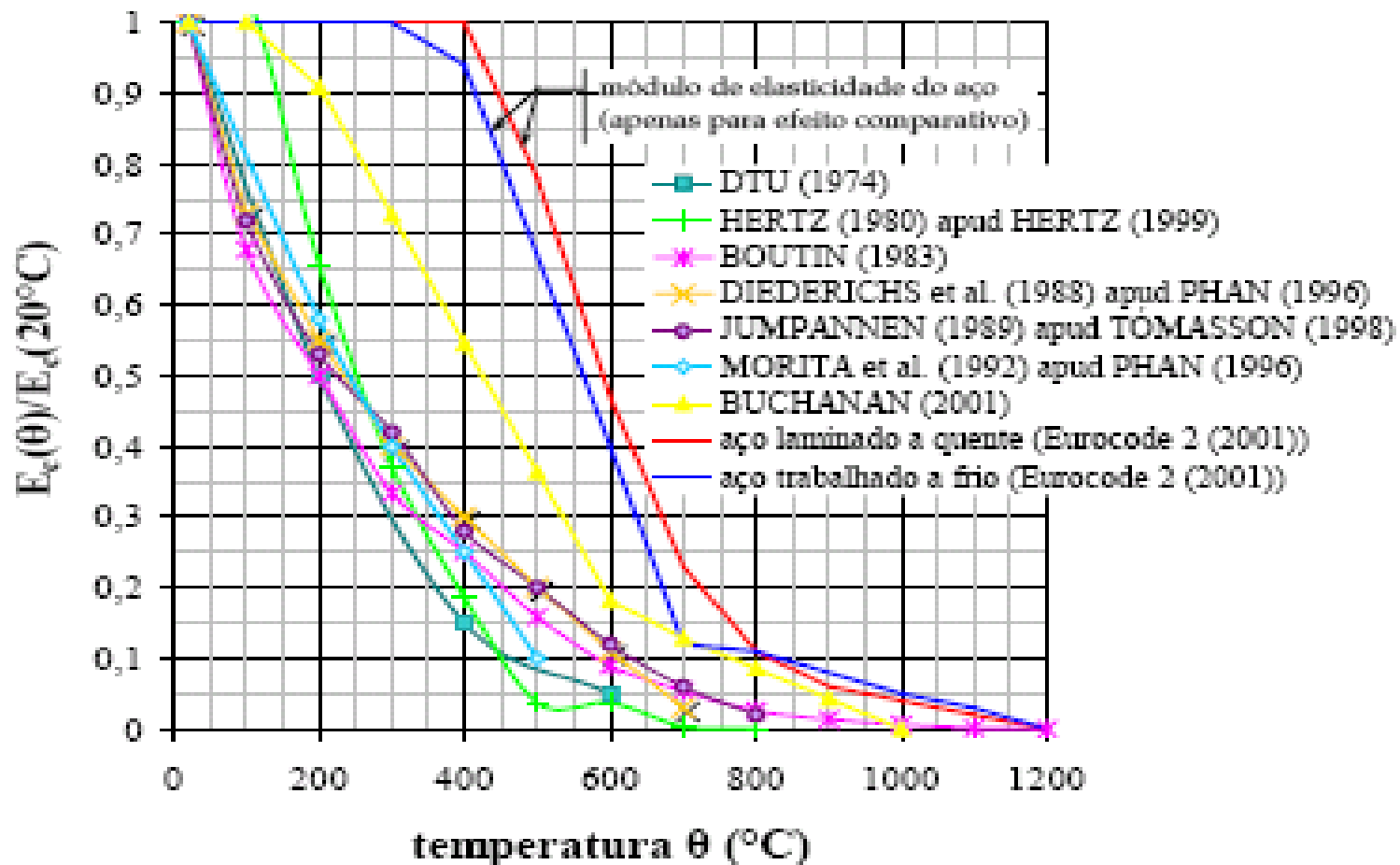


Figura 2.4: redução do módulo de elasticidade dos aços para concreto armado e do próprio concreto segundo alguns pesquisadores.

2. Aços trabalhados a frio

- Os aços são encruados, isto é, deformados a frio, para melhorar algumas características do material, como aumento da dureza e das tensões de escoamento e ruptura.
- O processo do encruamento reduz a ductilidade e aumenta a fragilidade. É um recurso empregado para aumentar a capacidade de trabalho de aços laminados, onde os grãos são deformados. A deformação imposta à microestrutura do aço pelo encruamento, aumenta as tensões internas e as imperfeições dos cristais. Para aliviar essas tensões e melhorar a estrutura cristalina, os aços encruados são submetidos a temperaturas entre 370 °C e 400 °C, consideradas baixas, a fim de evitar a recristalização do material (Petrucci (1978), Figueiredo *et al.* (2000)).
- Os aços encruados submetidos a altas temperaturas, como no caso de incêndios, além de sofrerem as mesmas reações dos aços laminados, tendem a uniformizar a distribuição dos grãos, retomando a estrutura original antes do encruamento. Portanto, o aço tipo encruado transforma-se em aço laminado e esta mudança de classe implica em uma redução de resistência de até 50% daquela inicial (Landi (1977)). Por exemplo, um edifício projetado com o aço CA-50B, após o incêndio, as armaduras aquecidas acima de 600 °C recuperam apenas 50% da sua resistência inicial, transformando-se em aço CA-25A. Embora não se produzam mais os aços “tipo B” para concreto armado, inúmeras construções construídas com eles estão sujeitas à eventualidade de um incêndio.

Aços de concreto protendido

- Os aços de concreto protendido também são produzidos por laminação e trefilação a frio para obterem grandes resistências à tração. Os grãos apresentam uma forma alongada na direção do fio, com lamelas de ferrita e cementita (Fe_3C) muito próximas umas das outras, reduzindo a possibilidade de movimentação entre si, além de dificultar a curvatura durante o trabalho a frio.
- As alterações drásticas em suas características mecânicas ocorrem em temperaturas mais baixas, da ordem de $400\text{ }^\circ\text{C}$, quando a tensão de ruptura se reduz a 50% da inicial em temperatura ambiente.
- Acima dos $540\text{ }^\circ\text{C}$, a estrutura cristalográfica desses aços se uniformiza e a $800\text{ }^\circ\text{C}$ inicia-se a descarbonização (Figueiredo *et al.* (2000), Landi (1977)). As perdas de resistência dos aços protendidos são permanentes devido à relaxação da armadura. Deste modo, elementos protendidos expostos à temperatura de $200\text{ }^\circ\text{C}$, mesmo por curta duração, apresentam alguns efeitos residuais (Malhotra (1982)).

Fissuração e Corrosão

- A ação do combate ao incêndio pode ser tão destrutiva ao concreto quanto à própria ação do fogo. Os resfriamentos e contrações abruptas provocam fissuras (Cánovas (1988)). Em uma estrutura de concreto aquecida próximo a 500 °C, a ação da água produz uma grande elevação de temperatura em virtude da reação de reidratação do óxido de cálcio livre no concreto.
- O aumento da temperatura incide em novas expansões térmicas e portanto, novas rachaduras. O óxido de cálcio é produto da desidratação do hidróxido de cálcio da pasta, a partir dos 400 °C. Nesse processo há redução no pH do concreto para valores inferiores a 12,5.
- Na reidratação, o hidróxido de cálcio da pasta endurecida do concreto se recompõe, recuperando o pH inicial apenas nas camadas superficiais molhadas, deixando interior ressecado do concreto despassivado à mercê da “frente de carbonatação” de fora para dentro, pois o agente responsável pela frente é o gás carbônico do ar.
- A passivação da armadura depende da alcalinidade do meio. Uma vez que a “frente de carbonatação” atinge a armadura, inicia-se o processo de corrosão.
- As armaduras em situação de incêndio também podem ser afetadas pelo ácido clorídrico desprendido pelos produtos de PVC e derivados, inclusos no interior de peças de concreto. A combustão dos condutos hidráulicos e elétricos de PVC, libera vapores ácidos que reduzem o pH do concreto e, portanto, podem despassivar as armaduras (Cánovas (1988), Suprenant (1997)).

Perda de aderência aço-concreto

- Independente do diâmetro das armaduras, a redução da aderência é muito maior em concretos resfriados rapidamente em água do que quando resfriados gradualmente ao ar (El-Hawary & Hamoush (1996)).
- Em aquecimentos de curta duração, próximos aos 100 °C, concretos resfriados gradativamente apresentaram um pequeno ganho de resistência na aderência. Após 100 °C, a redução da aderência entre as barras e concreto é sensível em função do aumento e duração do aquecimento.
- Acima dos 400 °C, a perda de aderência das armaduras é maior do que a redução de resistência à compressão dos concretos.
- A partir dos 600 °C, há perda completa de aderência (Cánovas, 1988). O “*sloughing*” também contribui à redução de aderência aço-concreto gradualmente; perdas de aderência dessa natureza tem sido observadas nos últimos estágios do incêndio (Purkiss (1996)).

Microscopia eletrônica de varredura

- Método interpretativo que baseia suas inferências na morfologia dos materiais analisados, é muito eficiente em estudos da microestrutura de concretos.
- São comparadas amostras de concreto das porções afetadas e não afetadas pelo fogo, na tentativa de reconhecer modificações minerais e texturais decorrentes de sua exposição às altas temperaturas.
- Nas amostras não modificadas pelo fogo, a microestrutura é compatível com concretos de boa qualidade, sendo maciça e definida por elevados teores de etringita, que ocorre como agulhas finas, dispersas pela pasta, por placas de hidratados hexagonais, correspondentes a aluminatos cálcicos hidratados e portlandita.

Amostras afetadas pelo fogo

- As porções expostas às altas temperaturas apresentam microestrutura com aspecto não coeso, friável, muito porosa, na qual só se identificam raramente, produtos hidratados de cimento.
- Etringita, um sulfoaluminato cálcico extremamente freqüente em pastas hidratadas, em geral, não é reconhecida nas amostras analisadas. Este fato é coerente com o esperado, já que etringita decompõe-se a temperaturas da ordem de 130 °C (Mackenzie 1972), em muito superadas durante o incêndio sofrido pela estrutura.

O Incêndio

23/7/2007

Estruturas Incendiadas

40

As fases do incêndio

- A variação de temperatura dos gases quentes é encontrada impondo-se o equilíbrio térmico dentro do compartimento. A energia que é liberada pelo incêndio depende da quantidade e do tipo de combustível presente, das condições de ventilação do ambiente e dos elementos de vedação (Burgess, 2001).
- Considera-se que um incêndio seja composto essencialmente de três fases chamadas de ignição, aquecimento (aumento de temperatura) e resfriamento (diminuição da temperatura).
- O período de maior crescimento da temperatura num incêndio compartimentado ocorre no período seguinte ao “flashover”, ponto esse onde todo material orgânico entra em combustão espontânea. A Fig. 1 representa a curva que descreve as fases de um incêndio.

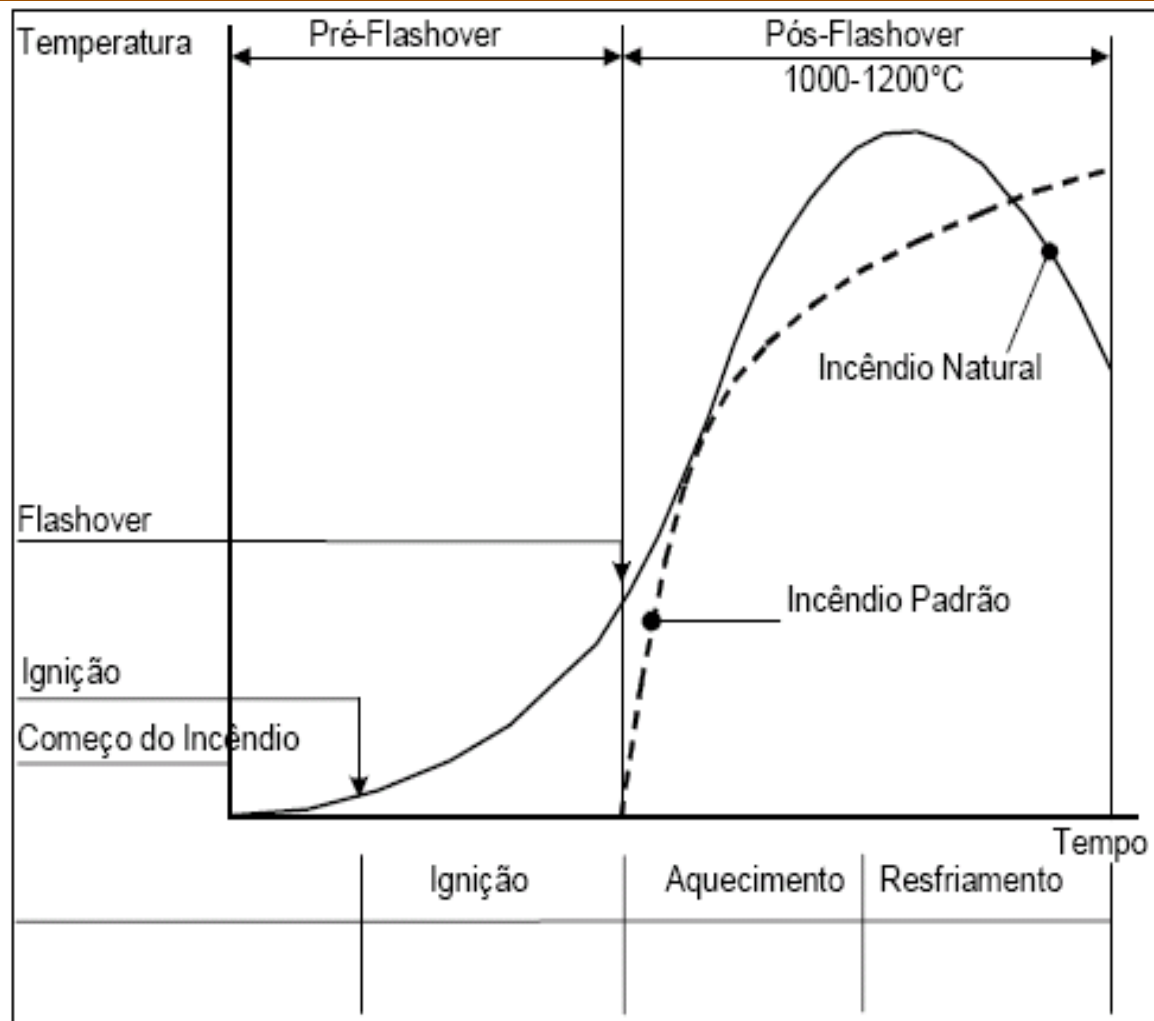


Figura 1 – Fases de um incêndio natural comparado ao incêndio-padrão (ISO 834, 1994).

Incêndio-padrão

- Conhecida internacionalmente como curva ISO-834, “curva-padrão” ou “incêndio-padrão”, é uma curva padronizada pela *International Organization for Standardization* (1975) para ensaios de resistência dos materiais construtivos, em incêndio de materiais celulósicos.
- O incêndio-padrão é tomado como referência para se estabelecer o “tempo requerido de resistência ao fogo” – TRRF, como medida de tempo da resistência dos elementos estruturais, por diversos códigos internacionais de segurança contra incêndios em edifícios.

Normas técnicas brasileiras

- No Brasil, a NBR 5628/01 toma o incêndio-padrão como referência em ensaios relacionados a incêndios celulósicos.
- A NBR 14432/00 – *Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos das Edificações* e a Instrução Técnica IT 08/01 (CB-PMESP (2001)) apresentam os tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF's) recomendáveis às edificações brasileiras, independentemente do material estrutural utilizado.
- A NBR 15200/04 – *Projeto de Estruturas de Concreto em situação de Incêndio - Procedimento*

Fases de um incêndio - Início

- A probabilidade do surgimento de um foco de incêndio a partir da interação dos materiais combustíveis existentes no interior do edifício e dos materiais combustíveis integrados ao sistema construtivo caracteriza o risco do início do incêndio.
- Caso haja uma oxigenação do ambiente através de comunicações diretas ou indiretas com o exterior, o fogo irá progredir, atingindo o estágio de inflamação generalizada.
- Grande quantidade de fumaça e gases quentes são gerados e os materiais combustíveis do ambiente, aquecidos por convecção e radiação, inflamar-se-ão conjuntamente. O fogo, então, atingirá rapidamente sua máxima severidade.

Fases de um incêndio – Inflamação generalizada

- A probabilidade do incêndio passar da fase inicial para a fase de inflamação generalizada, isto é, a probabilidade do foco de incêndio evoluir até atingir a inflamação generalizada caracteriza o risco do crescimento do incêndio.
- Durante esta segunda fase, os gases quentes e fumaça gerados no local de origem podem ser transferidos para outros ambientes, dentro do próprio edifício, através das aberturas de comunicação entre os mesmos.
- Em função da alta temperatura, o fogo se propagará para esses ambientes com maior rapidez, e os materiais combustíveis ali existentes também se queimarão com rapidez e intensidade maiores, se comparadas ao ambiente de origem.

Fases de um incêndio – Propagação e Extinção

- As altas temperaturas e os gases quentes emitidos através das janelas e/ou outras aberturas existentes na fachada ou na cobertura, provocadas pela ruína parcial, ocasionam a propagação do incêndio para os edifícios adjacentes.
- Com a ocorrência da propagação do fogo entre os ambientes do edifício de origem, os mecanismos de radiação e convecção serão acentuados, provocando uma incidência maior de fluxos de calor nas fachadas dos edifícios vizinhos.
- Somente quando grande parte dos materiais combustíveis forem consumidos é que o fogo entrará no processo de extinção.
- A probabilidade de propagação do incêndio, a partir da inflamação generalizada no ambiente de origem, para outros ambientes e/ou edifícios adjacentes caracteriza o risco da propagação do incêndio.

Risco à vida humana

- A geração de fumaça e de gases tóxicos, a redução da quantidade de oxigênio disponível e o calor desenvolvido em estágios mais avançados são fatores característicos das distintas fases do incêndio que oferecem risco à vida humana.
- A probabilidade dos fenômenos associados ao incêndio, tais como fumaça, gases nocivos, calor e falta de oxigenação, provocarem lesões aos ocupantes do edifício, tanto os usuários como as pessoas envolvidas no salvamento e combate, define o risco à vida humana.

Risco à propriedade

- O risco à propriedade está presente desde o momento do início do incêndio, podendo evoluir gradativamente atingindo a inflamação generalizada no ambiente e a propagação do fogo para outros ambientes e edifícios vizinhos.
- A fumaça, os gases quentes e o calor danificam os materiais e equipamentos contidos no edifício, assim como o próprio edifício, ou seja, os seus elementos construtivos e os edifícios adjacentes.
- Portanto, o risco à propriedade é caracterizado pela probabilidade de ocorrência desses fatores. Quanto mais suscetível for o sistema construtivo à ação do incêndio, maior será o risco à propriedade. O colapso estrutural de partes do edifício pode implicar em danos à áreas não atingidas pelo fogo e também à edifícios vizinhos

Fatores de alimentação do incêndio

A possibilidade de um foco de incêndio extinguir ou evoluir para um grande incêndio depende, basicamente, dos seguintes fatores:

- 1) quantidade, volume e espaçamento dos materiais combustíveis no local;
- 2) tamanho e situação das fontes de combustão;
- 3) área e localização das janelas;
- 4) velocidade e direção do vento;
- 5) a forma e dimensão do local.

Formas de propagação de incêndio

O calor e os incêndios se propagam por três maneiras fundamentais:

- 1) por **radiação**, ou seja, por meio de um gás ou do vácuo, na forma de energia radiante;
- 2) por **convecção**, ou seja, por meio de um fluido líquido ou gás, entre dois corpos submersos no fluido, ou entre um corpo e o fluido;
- 3) por **condução**, ou seja, através de um material sólido de uma região de temperatura elevada em direção a outra região de baixa temperatura.

Num incêndio, as três formas geralmente são concomitantes, embora em determinado momento uma delas seja predominante.

Formas de propagação de incêndio

A propagação do incêndio entre edifícios isolados pode se dar através dos seguintes mecanismos:

- 1) Radiação Térmica, emitida:
 - a) através das aberturas existentes na fachada do edifício incendiado;
 - b) através da cobertura do edifício incendiado;
 - c) pelas chamas que saem pelas aberturas na fachada ou pela cobertura;
 - d) pelas chamas desenvolvidas pela própria fachada, quando esta for composta por materiais combustíveis.
- 2) Convecção, que ocorre quando os gases quentes emitidos pelas aberturas existentes na fachada ou pela cobertura do edifício incendiado atinjam a fachada do edifício adjacente;
- 3) Condução, que ocorre quando as chamas da edificação ou parte da edificação contígua a outra atingem a esta transmitindo calor e incendiando a mesma.

Carga de incêndio

- O desenvolvimento e a duração de um incêndio são influenciados pela quantidade de combustível a queimar. Com ele, a duração decorre dividindo-se a quantidade de combustível pela taxa ou velocidade de combustão.
- Portanto, pode-se definir um parâmetro que exprime o poder calorífico médio da massa de materiais combustíveis por unidade de área de um local, que se denomina carga de incêndio específica (ou carga térmica) unitária (*fire load density*).
- Na carga de incêndio estão incluídos os componentes de construção, tais como revestimentos de piso, forro, paredes, divisórias, etc. (denominada carga de incêndio incorporada), mas também todo o material depositado na edificação, tais como peças de mobiliário, elementos de decoração, livros, papéis, peças de vestiário e materiais de consumo, denominada carga de incêndio temporal.

Conclusões

- Até 100 °C o concreto armado de dosagem normal mantém sua qualidade como material estrutural.
- Entre 300 e 400 °C, as fissuras superficiais tornam-se visíveis, embora o interior do concreto nas profundidades maiores que 10 mm apresente uma razoável integridade. Nessa faixa, tanto o concreto usual como o concreto de alta-resistência apresentam uma redução acentuada na resistência à compressão.
- Acima dos 600 °C há perda total de resistência do concreto como material estrutural.
- Aquecimentos de longa duração podem comprometer permanentemente as armaduras. Não se recupera totalmente as propriedades mecânicas dos aços laminados, quando aquecidos acima de 500 °C.
- Os aços encruados, perdem cerca de 50% da resistência inicial, pois sofrem alterações permanentes na microestrutura abaixo dos 500 °C.
- Se as ações de combate ao incêndio ocorrerem entre 400 e 600 °C, há choque térmico e fragmentação material com decréscimo maior de resistência, em face do resfriamento rápido por água de bombeiro e ainda, reações de carbonatação que comprometem a passivação das armaduras.

Referências bibliográficas

- Aïtcin, Pierre-Cloude. Concreto de Alto Desempenho. Ed. Pini. São Paulo, 2000.
- ACI, Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements. ACI 216R–89. ACI. New York, 1996.
- ABNT, Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações – Procedimento. NBR 14432/00. ABNT. RJ, 2000.
- ABNT, Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio. NBR 15200/04. RJ: ABNT, 2004.
- ISO, Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction – Part 1.1: General Requirements for Fire Resistance Testing. ISO 834. ISO/TC. Geneva, 1990.
- Metha, P. Kumar, Monteiro, Paulo J. M. Concreto — Estrutura, Propriedades e Materiais. Ed. Pini. S.Paulo, 1994.

Referências bibliográficas

- Costa, C.N; Rita, I.A; Silva, V.P. - Princípios do “método dos 500 °C” - Ibracon – Vol.VI - Projeto de Estruturas de Concreto - CBC0131 - pg. VI.1122 a 1138.
- Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de SP (CBPMESP). Regulamento de Segurança Contra Incêndio das Edificações e Áreas de Risco do Estado de SP Instruções Técnicas – IT. DE nº 46076/01 SP: Secretaria de Segurança Pública do Estado de SP, 2004. 1 Cd-rom
- Mitidieri, M.L; Ioshimoto, E. - Proposta de Classificação de Materiais e Componentes Construtivos com Relação ao Comportamento Frente ao Fogo - BT/PCC/222 – Epusp, 1998.
- Código de Segurança contra Incêndio e Pânico; decreto No 897, 21/09/76, Estado do RJ, 1976.
- Costa, C.N; Figueiredo, A.D; Silva, V.P. - Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas – NUTAU 2002

Sessão encerrada
Obrigado a todos

Eng^o Marcelo Iliescu
iliescu@iliescu.com.br
www.iliescu.com.br